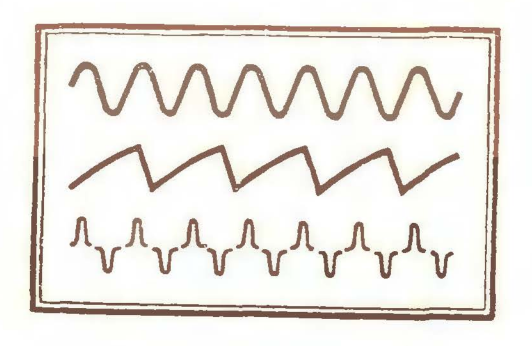
МАССОВАЯ
РАДИО-
БИБЛИОТЕКА

С. Э. ХАЙКИН

НЕЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ



Госэнергоиздат

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 181

С. Э. ХАЙКИН

НЕЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1953 ЛЕНИНГРАД

Книга посвящена изложению принципов действия различных генераторов незатухающих колебаний, применяемых в самых разнообразных областях радиотехники.

Рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

Редактор *А. А. Куликовский* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в набор 26/III 1953 г. Подписано к печати 27/V 1953 г.
Бумага 84×108¹/₃₂ Объем—6,56 п. л. Уч.-изд. л. 7,2
Т-02969 Тираж 25 000 Цена 2 р. 90 к. Зак. 104

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

Незатухающие электрические колебания, т. е. колебания с постоянной (не меняющейся во времени) амплитудой, чрезвычайно широко применяются в современной радиотехнике. Вряд ли целесообразно перечислять все те случаи, когда в радиотехнических устройствах применяются незатухающие колебания, и мы ограничимся только несколькими типичными примерами. Прежде всего во всех передающих радиостанциях как связных, радиовещательных, так и в станциях специального назначения (радиолокаторы, радиомаяки и т. д.) применяются незатухающие колебания. Правда, во многих случаях амплитуда колебаний, излучаемых передатчиком, не остается постоянной во времени, а изменяется, то увеличиваясь, то уменьшаясь в соответствии с характером передаваемых сигналов или звуков. Происходят эти изменения в результате модуляции амплитуды высокочастотных колебаний передаваемыми сигналами, но сами колебания, подвергающиеся модуляции, должны иметь постоянную амплитуду. Таким образом, хотя колебания, излучаемые передатчиком, часто имеют амплитуду, меняющуюся со временем, но для получения таких модулированных колебаний прежде всего должны быть созданы колебания с постоянной амплитудой, т. е. незатухающие колебания. Далее, в распространенном типе радиоприемника — супергетеродине — применяются незатухающие колебания для получения промежуточной частоты в смесителе. Наконец, в телевизионном приемнике для «свертывания изображения», т. е. для того, чтобы заставить электронный луч в определенной последовательности пробегать по экрану приемной трубки, применяется переменное напряжение пилообразной формы, которое также представляет собой один из типов незатухающих колебаний. Во всех разнообразных случаях, когда необходимо применять незатухающие колебания, приходится пользоваться генераторами незатухающих колебаний и эти генераторы являются одним из наиболее

распространенных и важных приборов в современной радиотехнике.

Разнообразные области применения незатухающих колебаний предъявляют совершенно различные требования к частоте, мощности и форме колебаний, создаваемых генераторами незатухающих колебаний. Однако, несмотря на разнообразие этих требований, во всех многообразных случаях их применений методы возбуждения незатухающих колебаний и принципы действия генераторов часто остаются одними и теми же. Например, принцип возбуждения незатухающих колебаний в гетеродине смесителя обычного супергетеродина аналогичен принципу возбуждения незатухающих колебаний в радиовещательном передатчике. Несмотря на различное назначение этих двух генераторов незатухающих колебаний и различные требования, к ним предъявляемые, в обоих генераторах применяется один и тот же метод возбуждения колебаний. Вообще, ни различие в мощностях генераторов, ни различие в частотах создаваемых ими колебаний не приводят к существенным различиям в принципе возбуждения незатухающих колебаний.

Наряду со сходством существуют, конечно, и значительные различия между генераторами незатухающих колебаний, применяемыми для различных целей. Так, например, методы возбуждения синусоидальных колебаний в гетеродине смесителя и методы возбуждения напряжений пилообразной формы в генераторах развертки телевизионного приемника значительно отличаются друг от друга.

Но, несмотря на различия между разнообразными генераторами незатухающих колебаний, в принципах их действия существует много общего, и поэтому всю проблему возбуждения незатухающих колебаний целесообразно рассматривать с одной точки зрения. Только задачу возбуждения колебаний сверхвысоких частот (соответствующих дециметровым и сантиметровым волнам) приходится рассматривать особо, ибо в этом случае применяются уже принципиально иные методы возбуждения незатухающих колебаний. Различие это обусловлено тем, что для сверхвысоких частот время, которое затрачивают электроны на пролет от одного электрода лампы до другого (так называемое пролетное время), становится уже сравнимым с периодом колебаний, между тем как для более медленных колебаний пролетное время пренебрежимо мало по сравнению с периодом. Поэтому для не слишком высоких частот можно считать, что за время пролета электрона напряжения на всех элек-

тродах лампы не успевают измениться и каждый электрон проходит весь путь внутри лампы в неизменном, как бы статическом электрическом поле. При таких условиях свойства электронной лампы определяются ее характеристиками, снятыми при постоянных напряжениях. Лампу можно рассматривать как проводник, свойства которого определяются этими характеристиками, и не интересоваться процессами, происходящими внутри лампы.

В случае же сверхвысоких частот напряжение на электродах лампы успевает измениться за время пролета электрона, поэтому свойства лампы становятся уже совершенно иными. Вместе с тем изменяются самые методы возбуждения незатухающих колебаний. В этом случае уже нельзя рассматривать электронную лампу просто как проводник с определенными характеристиками, и для понимания методов возбуждения незатухающих колебаний необходимо учитывать явления, происходящие внутри лампы, вследствие чего вся задача усложняется. В нашей книге мы не будем рассматривать этой сложной задачи (тем более, что радиолюбители пока еще не сталкиваются на практике с генераторами сверхвысоких частот) и ограничимся только вопросами возбуждения колебаний не слишком высоких частот. При этом ограничении, как уже сказано, для понимания принципов возбуждения незатухающих колебаний не нужно рассматривать процессов, происходящих внутри лампы. Лампа рассматривается как проводник с заданными свойствами, и задача сводится к тому, чтобы, исходя из этих свойств, объяснить, как лампа в том или ином случае поддерживает незатухающие колебания. Именно так мы будем ставить задачу и поэтому в дальнейшем не будем рассматривать процессов, происходящих внутри лампы (за исключением одного случая, когда потребуется объяснить происхождение падающего участка анодной характеристики лампы в динатронном режиме).

В разработке проблемы возбуждения незатухающих колебаний, как и в развитии всей радиотехники, выдающаяся роль принадлежит советским ученым. Трудами М. В. Шулейкина, М. А. Бонч-Бруевича, А. И. Берга были заложены основы теории ламповых генераторов незатухающих колебаний и созданы методы для расчета таких генераторов. Позднее Л. И. Мандельштамом, Н. Д. Папалекси, А. А. Андроновым, Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым были разработаны новые теоретические методы, позволяющие развить дальше теорию обычного лампового генера-

тора и построить теории некоторых других типов генераторов незатухающих колебаний, применяемых в радиотехнике. Исследование методов возбуждения незатухающих колебаний или автоколебаний[1], как их принято сейчас называть, является почти целиком заслугой советских ученых. В развитии теории и практики генераторов незатухающих колебаний, помимо упомянутых выше, принимали участие многие советские ученые-физики и инженеры: Д. А. Рожанский, Ю. Б. Кобзарев, К. Ф. Теодорчик, С. П. Стрелков, А. Л. Минц, И. Г. Кляцкин, Б. П. Асеев, М. С. Нейман, С. И. Евтянов, З. С. Модель, И. Х. Невяжский, В. И. Сифоров, Л. А. Меерович и др.

В этой важной области радиотехники советская научная мысль далеко опередила зарубежную, и здесь советским ученым, как и во многих других областях науки, принадлежит ведущая роль.

Автор

---

[1] Самый термин „автоколебания" введен в науку акад. А. А. Андроновым.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЛАМПОВЫЙ ГЕНЕРАТОР С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

1. ПРИНЦИП КОМПЕНСАЦИИ ЗАТУХАНИЯ

Обычный ламповый генератор, с которым чаще всего приходится сталкиваться радиолюбителю, создает незатухающие колебания благодаря наличию обратной связи. С таких генераторов мы и начнем рассмотрение методов возбуждения незатухающих колебаний. Несмотря на большое разнообразие схем таких генераторов, в них всегда можно указать три основных элемента, в том или ином виде присутствующих во всяком генераторе рассматриваемого типа. Эти элементы следующие:

1. Колебательный контур, в котором при отсутствии других элементов могли бы происходить собственные колебания, затухающие вследствие неизбежных потерь энергии в нем (часто ламповый генератор содержит не один, а два колебательных контура, но это уже детали, которые самого принципа действия лампового генератора не затрагивают).

2. Электронная лампа с обратной связью (т. е. со связью между цепями анода и сетки); лампа потребляет энергию от внешнего источника (анодной батареи, выпрямителя и т. п.) и при известных условиях ту или другую долю этой энергии может передавать колебательному контуру (опять-таки в ламповом генераторе может быть не одна, а несколько ламп, но это обстоятельство тоже не играет принципиальной роли).

3. Внешний источник энергии (анодная батарея, выпрямитель и т. п.), питающий электронную лампу и служащий для пополнения потерь энергии в колебательном контуре.

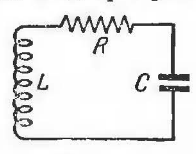
Перечислив эти три основных элемента лампового генератора с обратной связью, мы, в сущности, вместе с тем сформулировали и самый принцип действия такого генератора.

В самом деле, из сочетания этих элементов явствует и принцип получения незатухающих колебаний: электронная лампа потребляет энергию от внешнего источника и часть этой энергии отдает колебательному контуру. Поступающая в контур энергия компенсирует потери энергии в нем, вследствие чего собственные колебания контура становятся незатухающими. Этот метод получения незатухающих колебаний можно назвать методом компенсации затухания.

Идея метода компенсации затухания чрезвычайно проста. Однако самый механизм компенсации потерь в колебательном контуре далеко не прост и требует детального рассмотрения. И это рассмотрение необходимо потому, что механизм компенсации потерь в ламповом генераторе тесно связан со свойствами генератора. Для того чтобы понять, почему генератор ведет себя определенным образом, почему он обладает теми или иными свойствами, необходимо детально рассмотреть механизм компенсации потерь. Это детальное рассмотрение требует ясных представлений о свойствах самого колебательного контура, о причинах затухания собственных колебаний в нем и т. д. Поэтому мы сначала кратко напомним то, что нужно знать о собственных колебаниях в системе с затуханием, а затем уже перейдем к рассмотрению способов компенсации затухания. При этом мы будем пользоваться той аналогией, которая существует между механическими и электрическими колебаниями, и выводы относительно электрических колебательных систем будем пояснять на механических моделях. Механическими аналогиями широко пользуются для пояснения ряда электрических явлений, так как эти аналогии позволяют более наглядно представить себе изучаемые электрические явления. При рассмотрении принципов действия генераторов электрических незатухающих колебаний также очень полезны механические аналогии, т. е. сравнение этих генераторов с механизмами, совершающими механические незатухающие колебания. Наиболее распространенным и известным механизмом, совершающим механические незатухающие колебания, являются обыкновенные часы. Вместе с тем принцип действия часов во многом сходен с принципом действия генераторов электрических незатухающих колебаний. Как мы скоро убедимся, сопоставление лампового генератора с часами является очень поучительным, так как позволяет уяснить наиболее характерные черты всякого генератора незатухающих колебаний.

2. КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ С ПОТЕРЯМИ

Рассмотрим обычный колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности *L*, конденсатора *C* и активного сопротивления *R* (фиг. 1). Явления, происходящие в таком контуре, известны всем радиолюбителям. Мы поэтому опишем их очень кратко только для того, чтобы подчеркнуть те обстоятельства, которые важны для понимания работы генераторов.

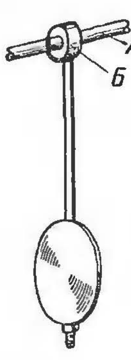


Фиг. 1.

Прежде всего посмотрим, при каких условиях могут возникнуть собственные колебания в контуре и какими свойствами эти колебания будут обладать. Для того чтобы в контуре возбудить колебания, нужен некоторый начальный «толчок», нужно вывести контур из состояния покоя. Этого можно достигнуть, сообщив конденсатору контура некоторый начальный заряд или пропустив по катушке контура некоторый ток. И в том и в другом случае мы сообщаем контуру определенный запас энергии: в случае начального заряда — это энергия электростатического поля в конденсаторе, а в случае начального тока—это энергия магнитного поля катушки. Можно, конечно, одновременно зарядить конденсатор контура и пропустить ток через его катушку. В этом случае контуру будет сообщен начальный запас как электрической, так и магнитной энергии. Сам контур не обладает никаким источником энергии, и поэтому колебания в нем могут возникать только за счет энергии, сообщенной контуру извне. Поскольку контур обладает сопротивлением, то при протекании по нему тока в этом сопротивлении будет рассеиваться (превращаться в тепло) некоторая часть энергии, сообщенной контуру, и запас энергии, который сообщен контуру начальным толчком, будет постепенно уменьшаться. Так как энергия колебаний связана с их амплитудой (энергия колебания, как известно, пропорциональна квадрату амплитуды колебаний), то при уменьшении энергии в колебательном контуре вместе с тем будет уменьшаться и амплитуда колебаний в нем — колебания, возникшие в контуре, будут постепенно затухать. Начальная амплитуда колебаний будет зависеть от начального запаса энергии, т. е. от величины начального толчка, а скорость убывания амплитуды будет зависеть от затухания контура, в частности от величины его сопротивления *R*. Но во всяком случае, так как контур обладает сопротивлением, возникшие в нем собственные колебания непременно будут затухать.

Следовательно, контур, обладающий сопротивлением, может создавать затухающие колебания, причем начальная амплитуда этих колебаний зависит от начальных условий, а скорость, с которой затухают колебания, — от свойств контура.

Те выводы, к которым мы пришли относительно собственных колебаний в электрических контурах с постоянным сопротивлением, полностью относятся и к механическим колебательным системам с постоянным трением. В качестве примера такой системы мы рассмотрим обычный маятник (фиг. 2), прикрепленный к втулке *Б*, которая может вращаться вокруг неподвижного вала *А*. Втулка эта, как бы тщательно она ни была сделана, будет вращаться вокруг вала с некоторым трением[1]. При колебаниях маятника вследствие трения между втулкой и валом часть энергии колебаний будет рассеиваться (превращаться в тепло) и колебания маятника будут затухать. Помимо преодоления трения во втулке, часть энергии колебаний будет расходоваться на преодоление сопротивления воздуха, окружающего маятник, но пока не принято специальных мер для уменьшения трения в подвесе, обусловленные этим трением потери будут гораздо больше, чем потери, вызванные сопротивлением воздуха, и поэтому наличием этих последних потерь можно пренебречь.



Фиг. 2.

Так же как собственные электрические колебания в контуре, который мы рассматривали, колебания маятника могут возникнуть только в том случае, если его толкнуть или отклонить, т. е. сообщить ему некоторый начальный запас энергии — кинетической при толчке и потенциальной при отклонении (можно, конечно, сообщить маятнику начальный запас и кинетической, и потенциальной энергии одновременно, если его отклонить и в отклоненном положении толкнуть). Начальная амплитуда колебаний будет определяться величиной начального толчка, а затухание амплитуды при колебаниях — величиной трения во втулке. Но во всяком случае собственные колебания маятника вследствие присутствия трения будут затухающими.

[1] Для уменьшения трения применяются специальные способы подвеса маятника. Маятник на втулке — это только модель, которая нам будет удобна при дальнейшем рассмотрении.

В обоих рассмотренных случаях собственные колебания затухают по одной и той же причине — вследствие потерь энергии из-за наличия электрического сопротивления в колебательном контуре или механического трения в подвесе маятника. Чтобы получить незатухающие колебания, нужно устранить потери энергии.

3. КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ БЕЗ ПОТЕРЬ

Если бы оказалось возможным устранить сопротивление в электрическом контуре (или трение в механической системе), то в такой системе должны были бы происходить незатухающие колебания, так как причина затухания колебаний — потери в сопротивлении (или потери на трение) — устранена. Однако, не говоря уже о том, что построить электрический контур без сопротивления или механическую систему без трения невозможно, такая воображаемая система без потерь по своим свойствам коренным образом отличалась бы от реальных ламповых генераторов. В самом деле, в колебательном контуре без потерь колебания не могут возникнуть сами по себе. Как и в контуре с потерями, для их возникновения нужен начальный толчок. После этого в контуре будут происходить незатухающие колебания, так как энергия в контуре не расходуется, т. е. остается постоянной, а вместе с тем остается постоянной и амплитуда колебаний. Однако энергия колебаний, а значит и амплитуда их, целиком определяется начальной энергией, т. е. величиной начального толчка, иначе говоря, начальными условиями. Таким образом, в системе без сопротивления (без трения) могут существовать незатухающие колебания, но, во-первых, эти колебания не могут возникнуть сами по себе и, во-вторых, амплитуда этих колебаний целиком определяется начальными условиями. В контуре без сопротивления могут происходить незатухающие колебания с любой амплитудой, так как сама система не обладает никакими свойствами, определяющими амплитуду колебаний. Поскольку затухание в системе отсутствует, колебания будут происходить все время с той амплитудой, которую они имели в начале.

Можно ли такую, пусть воображаемую, систему без потерь считать моделью лампового генератора? На первый взгляд как будто можно, так как основным свойством генератора эта система обладает — она создает незатухающие колебания.

Однако более детальное сравнение контура без потерь с ламповым генератором показывает, что контур без потерь не может служить моделью лампового генератора, ибо он не обладает другими свойствами лампового генератора. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим некоторые особенности лампового генератора.

Производя опыты с ламповым генератором, мы можем убедиться в двух важных его особенностях. Во-первых, легко убедиться, что амплитуда колебаний в генераторе изменяется при изменении величины обратной связи, других параметров его и режима лампы, — следовательно, амплитуда колебаний в генераторе зависит от свойств самого генератора.

Вместе с тем мы можем убедиться и в другом свойстве генератора незатухающих колебаний. Всякий раз, когда мы будем включать генератор, в нем будут возникать колебания с такой же амплитудой, как и после других включений, если только режим генератора (напряжения на электродах лампы, величина обратной связи и параметров колебательного контура) остался неизменным. Мы можем приводить генератор в действие разными способами, включая либо накал лампы, либо анодное напряжение, либо, например, замыкая накоротко большое сопротивление, включенное последовательно в колебательный контур генератора. Но совершенно независимо от того, каким способом мы будем приводить генератор в действие, в нормально работающем генераторе, всякий раз будет устанавливаться одна и та же определенная амплитуда колебаний, если режим генератора остался неизменным. Правда, ламповый генератор может иногда работать в таком режиме, что при одном способе включения (например, включении анодного напряжения) колебания в нем возникнут, а при другом способе включения (например, замыкании накоротко сопротивления в колебательном контуре) не возникнут, иначе говоря, для возникновения колебаний в генераторе иногда может быть нужен некоторый начальный толчок. Но это специальный режим, в который ламповый генератор может быть поставлен, а не общее свойство всех ламповых генераторов.

В дальнейшем (§ 14) этот специальный режим будет рассмотрен подробно, а пока мы исключим этот случай из рассмотрения. Тогда можно считать, что при любом способе включения в генераторе всегда будут устанавливаться колебания с одной и той же амплитудой. Это значит,

что амплитуда колебаний в генераторе не зависит от тех начальных условий, в которых находился генератор в момент включения.

Это чрезвычайно характерное свойство лампового генератора типично для всех вообще генераторов незатухающих колебаний. Все они обычно создают незатухающие колебания с определенной постоянной амплитудой, не зависящей от начальных условий и определяемой режимом самого генератора. И именно это свойство лампового генератора не позволяет считать воображаемый контур без потерь моделью лампового генератора, ибо в контуре без потерь амплитуда незатухающих колебаний никак не определяется свойствами самого контура и целиком зависит от начальных условий.

Итак, воображаемый контур без потерь не объясняет механизма возникновения и поддержания незатухающих колебаний в ламповом генераторе. Дело обстоит сложнее. Чтобы объяснить, как возникают и поддерживаются незатухающие колебания в ламповом генераторе, нужно более детально рассмотреть происходящие в нем явления.

4. ЧАСЫ КАК ГЕНЕРАТОР НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Принцип действия обычного лампового генератора мы прежде всего поясним на механической модели генератора незатухающих колебаний. Наиболее распространенным механическим «генератором» незатухающих колебаний, т. е. устройством, создающим механические незатухающие колебания, являются часы. Устройство часов, конечно, известно всем, поэтому мы только кратко его напомним, чтобы обратить внимание на сходство, которое существует между принципами устройства часов и обычного лампового генератора.

Как уже было отмечено, в ламповом генераторе можно выделить три основных элемента: 1) колебательный контур, в котором в отсутствии других элементов могли бы происходить затухающие колебания; 2) электронная лампа с обратной связью, потребляющая энергию от внешнего источника и отдающая часть этой энергии колебательному контуру, и, наконец, 3) внешний источник энергии, питающий электронную лампу, а значит, в конечном счете отдающий часть энергии колебательному контуру.

Во всяких часах можно выделить три аналогичных элемента: 1) колебательную систему, которая в отсутствии

других элементов могла бы совершать затухающие колебания, в маятниковых часах такой колебательной системой служит маятник, в карманных или ручных часах (а также в некоторых других типах часов) так называемый баланс— колесико, удерживаемое в положении равновесия спиральной пружиной и могущее совершать крутильные колебания; 2) механизм, который приводится в действие самой колебательной системой и в определенные моменты подталкивает ее, т. е. пополняет ее энергию (детали устройства этого механизма для нас несущественны и поэтому мы не будем их описывать), и, наконец, 3) источник энергии, от которого упомянутый механизм черпает энергию для передачи колебательной системе; этим источником энергии служит обычно скрученная, «заведенная» пружина (в часах с пружинным заводом) или поднятая гиря (в часах с гиревым заводом).

Уже из сопоставления основных элементов лампового генератора с основными элементами часов видно, сколь сходны принципы их действия. Поэтому рассмотрение метода поддержания незатухающих колебаний в часах будет очень полезно для уяснения принципа действия лампового генератора.

Идея метода поддержания колебаний в часах вряд ли требует подробных разъяснений и может быть изложена в нескольких словах. Колебательная система часов (маятник, баланс) сама по себе вследствие наличия в ней потерь на трение совершала бы затухающие колебания. Но толчки, создаваемые механизмом, действуют в те моменты, когда колебательная система проходит через положение равновесия, т. е. как раз в те моменты, когда скорость системы наибольшая. При этом толчки направлены в ту же сторону, в которую движется система; они увеличивают скорость колебательной системы, т. е. ее энергию. Энергия, которую получает колебательная система при толчке, как раз компенсирует потери энергии в этой системе за время, прошедшее с момента предыдущего толчка, и благодаря этому колебания системы не затухают. Рассмотрим теперь свойства незатухающих колебаний, получаемых тем способом, который только что был описан.

Очевидно, что незатухающие колебания могут происходить только с такой амплитудой, при которой потери энергии в колебательной системе за период как раз равны той энергии, которую за период механизм передает системе. Если бы потери энергии в системе были больше, чем энер-

гия, полученная от механизма, то колебания в системе затухали бы; в противном случае они нарастали бы.

При малых амплитудах, когда количество энергии, рассеиваемой при колебаниях, мало, энергия, поступающая в систему благодаря толчкам, превышает рассеиваемую энергию и колебания в системе нарастают. При этом растет количество энергии, рассеиваемой в системе. Правда, вместе с ростом амплитуды растет и количество энергии, поступающей в систему в результате толчков, но растет не так быстро, как количество рассеиваемой энергии. Потери энергии, возрастая с ростом амплитуды, «догоняют» поступление энергии и при некоторой определенной амплитуде потери и поступление энергии оказываются равными, а при дальнейшем росте амплитуд потери энергии уже превышают ее поступление.

Очевидно, когда амплитуда достигла такой величины, при которой потери и поступление энергии оказываются равными, дальнейший рост амплитуд прекращается, т. е. устанавливается некоторая стационарная (неизменная) амплитуда колебаний.

Если по какой-либо причине амплитуда колебаний возросла, то потери энергии превзойдут ее поступление в систему и колебания начнут затухать, пока амплитуда их не уменьшится до величины стационарной амплитуды. Если же по какой-либо причине амплитуда колебаний окажется меньше стационарной, то поступление энергии будет превышать ее потери и колебания в системе будут нарастать, пока их амплитуда снова не достигнет стационарного значения.

Таким образом, поддерживаются колебания маятника часов с вполне определенной стационарной амплитудой. Амплитуда эта, как ясно из только что сказанного, зависит от потерь энергии в колебательной системе и от того, какое количество энергии передает механизм системе при каждом толчке, т. е. в конечном счете от свойств самих часов. Так, например, если при прочих равных условиях затухание колебательной системы увеличится, то уменьшится та амплитуда, при которой величина потерь энергии в системе оказывается равной энергии, поступающей от механизма, — иначе говоря, уменьшится стационарная амплитуда. И если эта стационарная амплитуда окажется столь малой, что механизм, создающий толчки, уже перестает работать (для того чтобы колебательная система приводила в действие спусковое приспособление этого механизма, амплитуда ее

колебаний должна превосходить некоторую величину), то часы останавливаются. Вот почему часы, загрязнившиеся или заржавевшие, т. е. часы, у которых вследствие увеличившегося трения возросло затухание колебательной системе, останавливаются, хотя все части их механизма остаются исправными.

Как всем хорошо известно, если часы исправны, но почему-либо остановились (например, кончился завод), то чтобы они снова пошли, надо толкнуть их маятник (часы с балансом достаточно просто встряхнуть). Этим мы сообщаем колебательной системе часов некоторое начальное отклонение или начальную скорость, и система приходит в колебание. Если начальная амплитуда этих колебаний больше, чем стационарная амплитуда, то потери энергии в системе превышают поступление энергии от механизма и, следовательно, колебания, которые совершает система, сначала будут затухать (пока их амплитуда не уменьшится до стационарной), после чего колебания станут незатухающими. Наоборот, если началньая амплитуда меньше стационарной, то потери энергии в системе меньше, чем поступление энергии от механизма, и колебания системы нарастают (пока их амплитуда опять-таки не достигнет стационарной), после чего колебания станут незатухающими. Вот почему независимо от начальной амплитуды, т. е. от начальных условий, в часах всегда устанавливаются незатухающие колебания с определенной стационарной амплитудой[1]. Эта одна из наиболее характерных черт всякого генератора незатухающих колебаний обусловлена, как мы видим, самим принципом поддержания незатухающих колебаний.

Итак, мы выяснили, чем определяется амплитуда незатухающих колебаний маятника часов. Посмотрим теперь, чем определятся другие их свойства — период (частота) и форма. Если бы колебательная система часов была предоставлена самой себе, то период колебаний определялся бы свойствами самой системы (размерами маятника или размерами баланса и жесткостью спиральной пружины).

---

[1] Правда, если начальная амплитуда оказалась меньше той величины, при которой начинает работать механизм, подталкивающий колебательную систему, то энергия в колебательную систему поступать не будет и возникшие колебания затухнут — часы не пойдут. Эта особенность, характерная для часов, как уже упоминалось, иногда наблюдается и в ламповых генераторах. Мы, однако, не будем рассматривать этой особенности часов — необходимости начального толчка. Позднее она будет рассмотрена применительно к ламповому генератору.

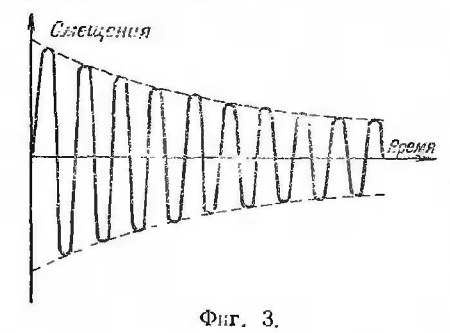
Но толчки, действующие со стороны механизма, в большей или меньшей степени нарушают движение колебательной системы, и поэтому период колебаний часов несколько отличается от периода самой колебательной системы. Однако чем меньше затухание колебательной системы, тем меньше потери энергии в ней и тем слабее должны быть толчки, которые пополняют потери энергии. А чем слабее толчки, тем меньше они нарушают движение системы и тем ближе период колебаний часов к периоду самой колебательной системы.

Поэтому, чтобы обеспечить точность хода часов, т. е. постоянство их периода, необходимо не только обеспечить постоянство периода самой колебательной системы, но и сделать очень малым ее затухание. Для этого, например, в хороших маятниковых часах применяются специальные способы подвески маятника, при которых потери на трение очень малы, маятнику придается такая форма, при которой сопротивление воздуха движению маятника также мало, и т. д. Аналогичные меры принимаются и в часах с балансом — для оси баланса применяются специальные подшипники с малым трением и т. д.

Малое затухание колебательной системы часов является первым условием их точного хода.

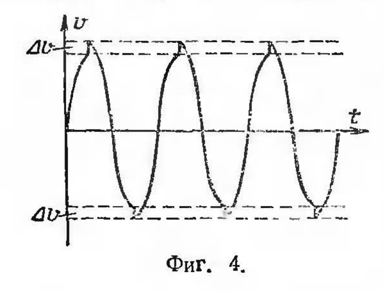
Однако указанное условие точности хода часов не является единственным. Есть еще одно важное условие, обеспечивающее точность хода часов. При малом затухании колебательной системы период колебаний часов, как мы выяснили, всегда будет близок к периоду самой колебательной системы. Поэтому, чтобы обеспечить постоянство периода колебаний часов, нужно также обеспечить постоянство периода самой колебательной системы маятника или баланса. Период колебаний маятника, как известно, определяется его размерами (моментом инерции и положением центра тяжести), а период колебаний баланса — его размерами и массой (в конечном счете — тоже его моментом инерции) и жесткостью спиральной пружины. Если, например, температура часов изменяется, то вследствие теплового расширения изменяется длина маятника, а значит и его период, в результате чего и период колебаний часов изменяется с температурой. Для устранения влияния температуры на ход часов в точных маятниковых часах применяются маятники, в которых благодаря специальной конструкции устранено влияние температуры на длину маятника, а значит и на его период. Соответствующие меры принимаются

и в точных часах с балансом. Нам нет надобности рассматривать подробно эти способы устранения влияния температуры на собственный период колебательной системы. Для нас важна только сущность этого второго условия повышения точности хода часов. Оба указанных условия постоянства хода часов аналогичны тем, с которыми мы встретимся в дальнейшем при рассмотрении вопросов о постоянстве частоты лампового генератора.



Фиг. 3.

Переходим к вопросу о форме незатухающих колебаний, совершаемых колебательной системой часов. Ответ на этот вопрос дают соображения, аналогичные тем, которые мы привели выше при рассмотрении вопроса о периоде колебаний. Сама по себе колебательная система совершает колебания, близкие к гармоническим, т. е. такие, форма которых близка к синусоидальной. Но это колебания затухающие (фиг. 3). Благодаря толчкам, увеличивающим скорость колебательной системы в моменты, когда эта скорость проходит через наибольшие значения, колебания становятся незатухающими. Следовательно, если на графике изображать изменения скорости v системы с временем t, то незатухающие колебания имеют форму затухающих половин «синусоид» сдвинутых друг относительно друга на величину приращения скорости Δv, происходящего в моменты толчков (фиг. 4)[1]. Следовательно, незатухающие колебания никогда не могут быть точно синусоидальными по форме. Однако если затуха-



Фиг. 4.

[1] Обычно на графиках изображают не изменения скорости, а изменения смещения (отклонения) системы со временем. Но если, например, отклонение изменяется по закону косинуса, то скорость изменяется по закону синуса, т. е. по форме графики смещения и скорости совпадают, они сдвинуты только по времени — когда смещение наибольшее, скорость равна нулю и наоборот.

ние колебательной системы мало, то мала и величина тех приращений скорости, которые компенсируют это затухание. Каждая из затухающих половин «синусоид» мало отличается от настоящей незатухающей половины синусоиды, и сдвиги между половинами «синусоид» также малы. Иначе говоря, при малом затухании колебательной системы форма незатухающих колебаний близка к синусоидальной и тем ближе, чем меньше затухание[1]. Поэтому у хороших часов колебания маятника очень близки по форме к синусоидальным; в плохих же часах (например, ходиках) часто даже на-глаз можно заметить, что движение маятника происходит не по синусоидальному закону (скорость меняется резко, а не плавно, как это должно было бы быть в случае синусоидального закона).

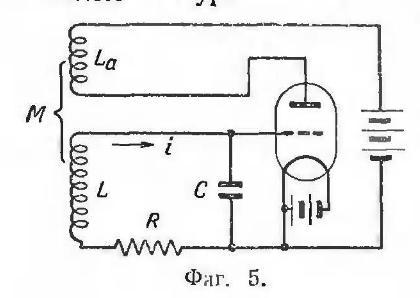
На этом мы закончим рассмотрение свойств часов как генератора незатухающих колебаний. Результатами этого рассмотрения мы будем пользоваться в дальнейшем для пояснения аналогичных свойств ламповых генераторов незатухающих колебаний.

5. ЛАМПОВЫЙ ГЕНЕРАТОР НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Как уже отмечалось, электронная лампа в схеме с обратной связью играет в ламповом генераторе такую же роль, какую играет в часах механизм, подталкивающий колебательную систему. Правда, электронная лампа и механизм часов выполняют эту роль, вообще говоря, по-разному. Различие состоит в том, что обратная связь в ламповом генераторе обычно действует на колебательный контур непрерывно, в то время как механизм часов действует на колебательную систему толчками. Однако различие это не только не принципиальное, но и не обязательное — ламповый генератор можно заставить работать в таком режиме, когда это различие вообще исчезает. Для того чтобы воспользоваться возможно более полной аналогией между ламповым генератором и часами и наиболее наглядно изложить принцип действия лампового генератора, мы начнем наше рассмотрение с лампового генератора, работающего именно в указанном специальном режиме. При этом речь будет итти об обычной схеме лампового генератора, например схеме

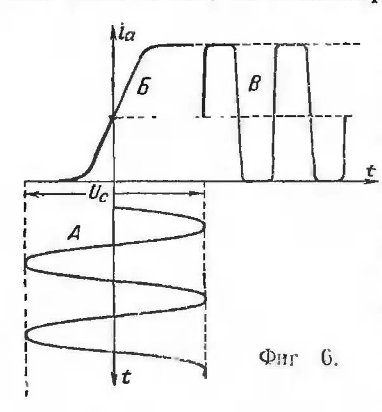
[1] На фиг. 4 для наглядности изображен случай, когда затухание колебательной системы значительно и Δv не очень мало. Если бы мы построили подобный график для хороших часов, затухание колебательной системы у которых очень мало, то отличие этих колебаний по форме от синусоидальных на-глаз не было бы заметно.

с колебательным контуром LC, в цепи сетки и с катушкой обратной связи L_a в анодной цепи, причем между катушками L и L_a существует взаимная индуктивность M (фиг. 5). Предположение же о специальном режиме состоит в том, что амплитуда незатухающих колебаний в колебательном контуре очень велика [1], столь велика, что амплитуда создаваемого ими напряжения U_{mc} на сетке лампы (кривая A на фиг. 6) выходит далеко за переделы наклонного участка характеристики лампы (фиг. 6, кривая $Б$). Вследствие этого, как видно из фиг. 6, импульсы анодного тока, создаваемые колебательным напряжением на сетке лампы, будут иметь резко выраженную «столообразную» форму (кривая $В$ на фиг. 6).



Фиг. 5.

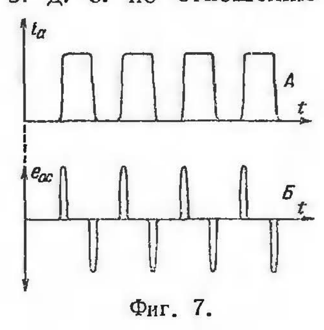
Так как э. д. с. индукции возникает только тогда, когда ток изменяется, то столообразные импульсы анодного тока (кривая A на фиг. 7), проходя по катушке L_a, будут создавать в колебательном контуре э. д. с. обратной связи $e_{o \cdot c}$ только в те моменты, когда ток в анодной цепи появляется или исчезает. Следовательно, в колебательном контуре будут возникать кратковременные импульсы э. д. с. чередующегося направления, так как при увеличении и уменьшении тока э. д. с. индукции направлена в противоположные стороны (кривая $Б$ на фиг. 7). Эти чередующиеся по направлению кратковременные импульсы э. д. с. будут возникать в моменты появления и исчезновения анодного тока, т. е. в моменты, соответствующие склонам столообразных импульсов анодного тока.



Фиг 6.

[1] Иначе говоря, мы рассматриваем работу лампового генератора, в котором уже установились незатухающие колебания с большой амплитудой. Условия, при которых в генераторе могут возникать колебания с большой амплитудой, выяснятся из дальнейшего.

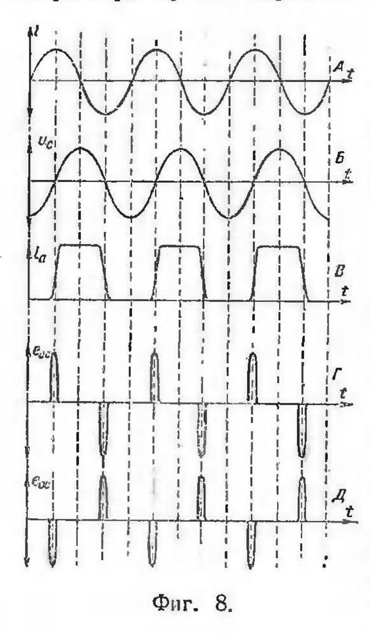
Посмотрим теперь, каково будет действие кратковременных импульсов э. д. с. на колебания, происходящие в контуре LC. Это действие может быть существенно различным в зависимости от того, в какие моменты импульсы действуют, или, иначе говоря, какова их фаза по отношению к фазе происходящих в контуре колебаний. Поэтому нам нужно более детально рассмотреть вопрос о фазе, в которой могут действовать импульсы э. д. с. по отношению к фазе колебаний в контуре. Начнем рассмотрение с фазы тока в катушке колебательного контура. Пусть кривая *А* на фиг. 8 изображает изменения тока i в колебательном контуре, причем за положительное направление принято направление от верхнего конца катушки L к конденсатору C, которое на фиг. 5 изображено стрелкой (иначе говоря, если ток имеет в данный момент положительное значение, то это значит, что он проходит в направлении, указанном стрелкой; если отрицательное, — то в обратном направлении). При выбранном положительном направлении, пока ток положителен, конденсатор будет заряжаться так, что напряжение u_c на сетке лампы будет возрастать (кривая *Б* на фиг. 8). В момент, когда ток, проходящий в положительном направлении, упадет до нуля, напряжение на сетке лампы достигнет наибольшего положительного значения. После того как значение тока изменит знак, конденсатор начнет разряжаться, затем заряжаться зарядом противоположного знака и достигнет наибольшего отрицательного значения, когда ток снова обратится в нуль. Словом, как всегда в колебательном контуре, напряжение на конденсаторе достигает наибольших значений, когда ток в контуре проходит через нуль, т. е. напряжение на конденсаторе, а значит и на сетке лампы (кривая *Б* на фиг. 8) сдвинуто по фазе по отношению к току в контуре (кривая *А* на фиг. 8) на четверть периода.



Фиг. 7.

Далее, как мы уже знаем, импульсы анодного тока возникают в моменты, когда напряжение на сетке становится положительным, и исчезают, когда оно становится отрицательным, т. е. анодный ток i_a будет изображаться кривой *В* на фиг. 8. Наконец, кратковременные импульсы э. д. с. обратной связи $e_{o.c}$ будут возникать в моменты,

соответствующие склонам столообразной кривой анодного тока, т. е. в моменты, когда напряжение на сетке лампы меняет знак, а ток в колебательном контуре проходит через наибольшие значения. Импульсы э. д. с. всегда будут чередующимися по направлению, но направление тех и других импульсов одновременно может быть изменено на обратное, например, путем переключения концов катушки обратной связи. Следовательно, в зависимости от направления включения катушки обратной связи импульсы э. д. с. могут либо совпадать с направлением тока в контуре в этот момент и, значит, значение э. д. с. будет положительно, когда значение тока положительно (кривая *Г* на фиг. 8), либо направлены навстречу току в контуре и, значит, значение э. д. с. будет отрицательно, когда значение тока положительно (кривая *Д* на фиг. 8). Поскольку направление импульсов в обоих случаях противоположно, то и действие их на колебания, происходящие в контуре, в обоих случаях также будет противоположно. В самом деле, когда ток течет в ту же сторону, куда направлена э. д. с., эта э. д. с. совершает положительную работу, т. е. отдает энергию в цепь, в которой эта э. д. с. действует. Наоборот, когда ток течет навстречу действующей в цепи э. д. с., эта э. д. с. совершает отрицательную работу, т. е. отбирает энергию из цепи, в которой эта э. д. с. действует.



Фиг. 8.

Следовательно, в первом случае э. д. с. обратной связи совершает положительную работу и передает энергию из анодной цепи в колебательный контур, во втором э. д. с. совершает отрицательную работу, т. е. отбирает энергию из колебательного контура и отдает ее анодной цепи (эта энергия рассеивается в виде тепла на аноде лампы). Ясно, что в первом случае обратная связь увеличивает энергию колебаний в контуре и компенсирует затухание этих колебаний, обусловленное рассеянием энергии в контуре; во

втором же случае обратная связь уменьшает энергию колебаний в контуре и может только еще больше увеличить затухание этих колебаний [1]. Таким образом, в зависимости от направления включения катушки L_a обратная связь может либо компенсировать затухание колебаний в колебательном контуре, либо, наоборот, увеличивать это затухание. В первом случае обратную связь принято называть положительной, а во втором — отрицательной [2].

Если при положительной обратной связи поступление энергии в контур будет полностью компенсировать потери энергии в самом контуре, то в нем будут существовать незатухающие колебания. Эти колебания поддерживаются кратковременными импульсами (толчками) э. д. с. совершенно аналогично тому, как колебания маятника часов поддерживаются толчками их механизма. Таким образом, в рассмотренном случае «механизм» лампового генератора действует совершенно так же, как механизм часов. Поэтому мы можем все те выводы, которые были сделаны относительно амплитуды, периода и формы, колебаний, совершаемых маятником часов, применить и к ламповому генератору. Мы можем сразу сказать, что чем меньше затухание колебательного контура, тем больше амплитуда незатухающих колебаний, создаваемых генератором, тем ближе период этих колебаний к собственному периоду колебательного контура и тем ближе форма этих колебаний к синусоидальной. Так, на основании только аналогии между принципами действия часов и лампового генератора мы можем сразу без детального рассмотрения сделать некоторые важные выводы относительно свойств колебаний, создаваемых генератором.

Однако вопрос об амплитуде колебаний, создаваемых ламповым генератором, следует рассмотреть более подробно, чем это может быть сделано на основании указанной аналогии. В самом деле, в нашем рассмотрении мы исходим из предположения, что напряжение на сетке генератора, развиваемое незатухающими колебаниями в контуре, выхо-

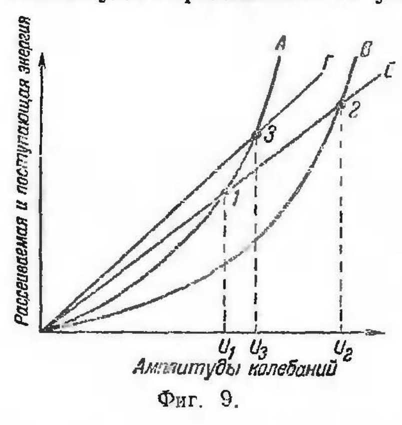
---

[1] Этому второму случаю в часах соответствовал бы механизм, который при прохождении маятника через отвесное положение подталкивал маятник не в том направлении, в котором он движется, а в противоположном направлении. Ясно, что в таких „часах" колебания маятника быстро бы затухали.

[2] Как нужно выбрать направление включения катушки для того, чтобы осуществить положительную обратную связь, будет выяснено в дальнейшем, при более детальном рассмотрении работы лампового генератора.

дит далеко за пределы рабочего участка характеристики лампы. Между тем мы не знаем, при каких условиях это предположение может быть выполнено и даже, вообще, выполнимо ли оно. Чтобы ответить на эти вопросы, выясним, чем определяется амплитуда незатухающих колебаний в ламповом генераторе при рассматриваемом режиме.

Как уже неоднократно указывалось, стационарная амплитуда определяется из условия, что при ней в среднем за период потери энергии в контуре как раз равны энергии, поступающей в контур за счет э. д. с. обратной связи. Потери энергии в колебательном контуре в каждый очень малый промежуток времени пропорциональны квадрату мгновенного значения силы тока в этот промежуток времени (столь малый, что величину тока в течение этого промежутка времени можно считать постоянной), а в среднем за период потери энергии пропорциональны квадрату амплитуды колебаний. Графически зависимость потерь энергии в контуре от амплитуды колебаний в нем изобразится кривой *А* на фиг. 9. С другой стороны, энергия, поступающая в контур за счет э. д. с. обратной связи, равна работе, совершаемой этой э. д. с. Как известно, работа, совершаемая в цепи, равна произведению величины э. д. с. на величину тока, текущего в цепи, и на время, в течение которого э. д. с. действует. Но величина э. д. с. и время, в течение которого она действует, не зависят от амплитуды колебаний в контуре и определяются только высотой и формой импульсов анодного тока [1].



Фиг. 9.

Поэтому работа, совершаемая э. д. с., оказывается пропорциональной силе тока в контуре в момент, когда дей-

[1] Точнее говоря, при изменении амплитуды напряжения на сетке форма импульсов анодного тока изменяется и поэтому меняются величина импульсов э. д. с. и их продолжительность. Но если амплитуда напряжений на сетке уже достаточно велика, то величина и продолжительность импульсов э. д. с. при дальнейшем увеличении амплитуды меняются уже незначительно и притом так, что их произведение можно считать постоянным.

ствует импульс э. д. с. Эти импульсы действуют в те моменты, когда ток в контуре имеет амплитудное значение. Следовательно, работа совершаемая э. д. с. в контуре, оказывается пропорциональной амплитуде колебаний в контуре. Графически эта зависимость выражается прямой линией (кривая *Б* на фиг. 9). В той точке *1*, где прямая *Б* пересекает кривую *А*, энергия, поступающая в контур, равна потерям энергии в нем, и, следовательно, колебания с амплитудой U_1 (фиг. 9) будут незатухающими. Если колебания происходят с амплитудой, меньшей, чем U_1, то энергия, поступающая в контур, больше, чем потери энергии в нем, и колебания в контуре будут нарастать. Если в контуре происходят колебания с амплитудой, большей U_1, то энергия, поступающая в контур, меньше, чем потери энергии в нем, и колебания в контуре будут затухать. Очевидно, какова бы ни была начальная амплитуда колебаний в контуре, в конце концов в нем установятся незатухающие колебания с амплитудой U_1.

Легко выяснить, от чего зависит величина этой амплитуды. Если, например, мы уменьшим затухание колебательного конутура, то кривая потерь в контуре расположится более полого (кривая *В* на фиг. 9) и точке пересечения ее с прямой поступления энергии (прямой *Б*), т. е. точке *2*, будет соответствовать стационарная амплитуда U_2, которая больше, чем U_1; следовательно, стационарная амплитуда растет по мере уменьшения затухания контура. Если не меняя затухания увеличить обратную связь, т. е. взаимоиндукцию между катушками L_a и L, то увеличатся импульсы э. д. с. в колебательном контуре, и прямая поступления энергии пойдет круче (прямая *Г* на фиг. 9). Прямая *Г* пересечет кривую *А* в точке *3*, которой соответствует стационарная амплитуда U_3. Поскольку U_3 больше, чем U_1, то значит усиление обратной связи также приводит к увеличению стационарной амплитуды.

Выяснив, чем определяется величина стационарной амплитуды, мы можем указать, в каком случае будет выполнено наше предположение о том, что амплитуды колебаний на сетке выходят далеко за пределы рабочей части характеристики. Для этого нужно сделать достаточно сильной обратную связь и достаточно малым затухание колебательного контура генератора. Мы убедились, таким образом, что режим генератора, который мы рассматриваем, вполне осуществим на практике.

Однако ограничиться рассмотрением только такого случая, когда амплитуды напряжения на сетке очень велики, все же нельзя, так как мы тогда ничего не сможем сказать о поведении лампового генератора в то время, когда амплитуда происходящих в нем колебаний мала, например, когда колебания в генераторе только возникли и еще не успели нарасти до значительной величины. Поэтому при дальнейшем рассмотрении мы откажемся от предположения, что в генераторе уже происходят колебания с большой амплитудой. Но прежде чем переходить к такому рассмотрению, взглянем на работу лампового генератора при больших амплитудах еще и с несколько иной точки зрения.

6. НЕЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ КАК ОСОБЫЙ СЛУЧАЙ РЕЗОНАНСА

Явления, происходящие в генераторах незатухающих колебаний, можно толковать как некоторый особый случай резонанса.

Как известно, явление резонанса состоит в том, что амплитуда вынужденных колебаний, которые совершает колебательная система под действием внешней силы, достигает максимальной величины в том случае, когда частота внешней силы совпадает с частотой собственных колебаний системы. Следовательно, вынужденные колебания (частота которых равна частоте внешней силы) при точном резонансе имеют ту же частоту, что и собственные колебания системы. Это обстоятельство позволяет рассматривать точный резонанс как случай, когда внешняя сила как бы поддерживает собственные колебания системы. В отсутствии внешней силы собственные колебания были бы затухающими, а под действием внешней силы при точном резонансе эти собственные колебания становятся незатухающими.

При таком толковании явления резонанса сразу выступает сходство между этим явлением и процессами, происходящими в генераторе незатухающих колебаний. Однако между этими двумя явлениями, помимо отмеченного сходства, есть и принципиальное различие. В случае резонанса действует внешняя сила, частота которой, вообще говоря, может быть отлична от частоты собственных колебаний системы, и нужно специально заботиться о том, чтобы эти частоты совпали. В случае же генератора незатухающих колебаний роль внешней силы выполняет воздействие на колебательную систему со стороны устройства, содержащегося в самом генераторе (специальный механизм часов, создаю-

щий толчки, или электронная лампа с обратной связью), причем это устройство управляется самой колебательной системой и поэтому частота его воздействия на систему автоматически оказывается равной собственной частоте системы.

Можно сказать иначе. В случае генератора незатухающих колебаний на него действует постоянная, а не периодическая внешняя сила (это сила, с которой действует заводной механизм часов или э. д. с. анодной батареи лампового генератора). Эта сила сама по себе является не периодической, а постоянной, однако устройство, содержащееся в самом генераторе, превращает постоянную силу в периодическую, действующую с частотой, равной частоте собственных колебаний генератора. Генератор сам «разрубает» постоянную внешнюю силу на отдельные импульсы, частота которых совпадает с собственной частотой системы[1]. Дальше все явления в генераторе незатухающих колебаний протекают, как и в случае обычного резонанса. Вот почему незатухающие колебания в генераторе можно рассматривать как особый случай резонанса, который можно называть авторезонансом. Приставка «авто» указывает на ту особенность, что частота внешнего воздействия не специально подбирается, а автоматически устанавливается равной собственной частоте системы.

Рассмотрение процесса, происходящего в генераторе незатухающих колебаний, как явления авторезонанса может быть полезно не только для выявления общих черт этих генераторов, но и для решения конкретных вопросов. Прежде всего, это рассмотрение позволяет дать новое наглядное истолкование тех выводов, к которым мы пришли выше в отношении формы колебаний, создаваемых тем или иным генератором.

С точки зрения авторезонанса по вопросу о форме незатухающих колебаний можно рассуждать следующим образом. Если внешнее воздействие на колебательную систему имеет форму, отличную от синусоидальной, то его следует разложить на гармонические составляющие, т. е. на сумму синусоидальных воздействий с частотами, кратными основ-

[1] Поскольку генератор незатухающих колебаний превращает постоянную внешнюю силу в периодическую, он представляет собой один из частных случаев преобразователя частоты. Постоянная э. д. с. (т. е. э. д. с. нулевой частоты) преобразуется в нем в переменную э. д. с. обратной связи, имеющую частоту, равную частоте колебаний генератора.

ной частоте воздействия. Однако из всего этого спектра внешнего воздействия колебательная система с малым затуханием выделит (подчеркнет) только ту синусоидальную составляющую, частота которой совпадает с частотой самой системы.

В рассматриваемом случае внешним воздействием являются толчки со стороны механизма часов или импульсы э. д. с. обратной связи (в случае лампового генератора), и их частота совпадает с собственной частотой системы. Поэтому система выделит из спектра внешнего воздействия только основной тон (первую гармонику). Все остальные гармоники в контуре будут подавлены по сравнению с основным тоном, и тем сильнее подавлены, чем меньше затухание системы. Следовательно, независимо от спектра внешнего воздействия, т. е. от формы толчков механизма или импульсов анодного тока генератора, в колебательной системе колебания будут по форме тем ближе к синусоидальным, чем меньше затухание системы.

Так объясняются с точки зрения явления авторезонанса полученные нами выше результаты относительно формы незатухающих колебаний. Совершенно естественно также объясняется с точки зрения авторезонанса и полученный выше результат относительно зависимости стационарной амплитуды колебаний от затухания контура.

В самом деле, в случае резонанса чем меньше затухание, т. е. чем больше добротность контура, на который действует внешняя сила, тем больше амплитуда вынужденных колебаний в этом контуре. В ламповом генераторе, как мы видели, существует такая же связь между затуханием контура и стационарной амплитудой колебаний. Более того, на основании известных количественных соотношений между затуханием контура и амплитудой вынужденных колебаний при резонансе может быть установлена количественная связь между стационарной амплитудой колебаний и затуханием колебательного контура в ламповом генераторе. Так же как и амплитуда вынужденных колебаний при резонансе, стационарная амплитуда колебаний в ламповом генераторе должна быть обратно пропорциональна затуханию контура, т. е. при прочих равных условиях уменьшение затухания контура в определенное число раз должно приводить к увеличению стационарной амплитуды во столько же раз.

Прочие равные условия, о которых мы только что упомянули, сводятся к тому, что изменяется только затухание

колебательного контура, но не изменяется величина внешней силы. В случае резонанса это условие обычно соблюдается, так как характер внешнего воздействия в большинстве случаев не изменяется при изменении свойств контура (если источник внешней переменной э. д. с. имеет большой запас мощности и резонансный контур его мало нагружает). В случае же авторезонанса это условие соблюдается далеко не всегда, а только в специальных случаях. В самом деле, в рассматриваемом конкретном случае лампового генератора, для того чтобы не изменялось внешнее воздействие на колебательный контур, необходимо, чтобы величина и форма импульсов анодного тока не изменялись бы при изменении амплитуды колебаний в контуре.

Как уже было указано, это последнее условие практически соблюдается в том случае, когда амплитуды колебаний на сетке лампы выходят далеко за пределы рабочей части характеристики лампы. В противном случае высота и форма импульсов анодного тока существенно зависят от амплитуды колебаний в контуре. Поэтому рассмотрение лампового генератора с точки зрения авторезонанса, так же как и все рассмотрение, проведенное в предыдущем параграфе, применим только для исследования генератора, в котором уже существуют незатухающие колебания большой амплитуды. Для того же, чтобы исследовать свойства лампового генератора при малых стационарных амплитудах, или для того, чтобы проследить за тем, как нарастают колебания генератора вначале (пока они еще не достигли стационарной амплитуды), необходимо, как уже сказано, более детальное рассмотрение, к которому мы и переходим.

7. КОМПЕНСАЦИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Незатухающие колебания в ламповом генераторе, как уже неоднократно указывалось, могут существовать потому, что неизбежные потери энергии в контуре компенсируются той энергией, которая благодаря обратной связи поступает в контур из анодной цепи. Если в среднем за период в контур поступает столько же энергии, сколько в нем рассеивается, то энергия, а значит и амплитуда колебаний в контуре будут оставаться неизменными, и колебания в контуре будут незатухающими. При этом рассеяние энергии в колебательном контуре происходит в течение всего периода колебаний, поступление же энергии может происходить только в течение той или иной доли периода.

Для получения незатухающих колебаний не обязательно, чтобы в любой малый промежуток времени в колебательный контур поступало бы точно столько же энергии, сколько в нем рассеялось за тот же промежуток времени. Достаточно, если *в среднем за период в контур будет поступать столько же энергии, сколько в нем за период рассеивается.* Например, в рассмотренном нами выше случае лампового генератора при больших амплитудах колебаний энергия в контур поступает только в течение двух очень коротких долей периода, когда в контуре появляется или исчезает импульс э. д. с. обратной связи. Это один предельный случай компенсации потерь энергии за период.

Можно себе представить и другой предельный случай компенсации потерь, когда за сколь угодно малый промежуток времени колебательный контур получает из анодной цепи точно столько же энергии, сколько за этот же промежуток времени в контуре рассеивается. Как мы увидим в дальнейшем, этот предельный случай никогда не может быть в точности осуществлен на практике. Но даже если бы его удалось точно осуществить, то мы получили бы генератор незатухающих колебаний, по своим свойствам принципиально отличающийся от тех ламповых генераторов, с которыми нам приходится встречаться на практике.

В самом деле, если бы за любой сколь угодно короткий промежуток времени (независимо от того, каковы в это время мгновенные значения напряжения и силы тока в контуре) потери энергии в контуре в точности компенсировались бы энергией, поступающей за этот же промежуток времени из анодной цепи, то такой генератор вел бы себя в точности так же, как колебательный контур без потерь. Но, как мы убедились (§ 3), ламповый генератор принципиально отличается от воображаемого контура без потерь тем, что в генераторе стационарная амплитуда определяется свойствами самого генератора и обычно совсем не зависит от начальных условий; в контуре же без потерь амплитуда незатухающих колебаний целиком определялась бы не свойствами контура, а начальными условиями.

Поэтому рассмотрение второго предельного случая (когда в контуре в точности компенсируются потери энергии за любой малый промежуток времени) не объяснит нам поведения какого-либо реального лампового генератора. Но все же, как мы убедимся в дальнейшем, во многих случаях картина компенсации потерь в реальных ламповых генераторах гораздо ближе к второму предельному случаю, чем

к первому. Поэтому рассмотрение второго предельного случая весьма полезно, тем более, что в процессе этого рассмотрения будут выяснены те различия, которые существуют между воображаемой картиной точной компенсации потерь в контуре и компенсацией потерь в реальных ламповых генераторах.

Итак, мы должны рассмотреть, как с помощью обратной связи можно было бы добиться того, чтобы энергия, которую отдает в контур э. д. с. обратной связи, за любой сколь угодно малый промежуток времени была бы точно равна потерям энергии в контуре за тот же промежуток времени.

Потери энергии в контуре обусловлены тем, что он обладает сопротивлением[1]. Происходят они следующим образом. Если по сопротивлению R течет ток i, то на сопротивлении возникает падение напряжения $u_R = Ri$, и так как направление этого падения напряжения совпадает с направлением текущего по проводнику тока, то электрические силы (существующие в проводе, поскольку в нем есть падение напряжения) совершают за малый промежуток времени Δt положительную работу $\Delta A = u_R i \Delta t$ или так как $u_R = Ri$, то

$$\Delta A = Ri^2 \Delta t.$$

Эта работа идет на нагрев проводника и, следовательно, за время Δt в контуре рассеивается энергия

$$\Delta W_1 = Ri^2 \Delta t.$$

С другой стороны, энергия, поступающая в контур за время Δt, равна работе, совершаемой э. д. с. обратной связи $e_{o.c}$, и определяется выражением:

$$\Delta W_2 = e_{o.c} i \Delta t.$$

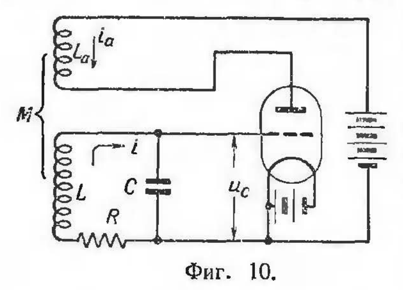
Для того чтобы поступающая энергия и рассеиваемая энергия всегда были равны, нужно, чтобы в любой момент времени соблюдалось равенство $\Delta W_2 = \Delta W_1$, т. е.

$$e_{o.c} i = Ri^2, \text{ или } e_{o.c} = Ri.$$

[1] Потери, обусловленные другими причинами, например, диэлектрические потери в конденсаторе, ничего принципиально нового в наше рассмотрение не внесут, и поэтому мы будем считать, что все потери обусловлены только сопротивлением проводов контура.

Иначе говоря, для точной компенсации потерь необходимо, чтобы э. д. с. обратной связи была в любой момент равна падению напряжения на сопротивлении контура. В таком случае можно сказать, что обратная связь компенсирует сопротивление контура.

Способ компенсации сопротивления колебательного контура с помощью обратной связи мы рассмотрим для той же схемы лампового генератора, которую мы уже рассматривали,—с колебательным контуром в цепи сетки и с катушкой обратной связи в цепи анода (фиг. 10). Взаимная индуктивность катушек сетки и анода пусть будет равна M. Мы предположим для простоты рассмотрения, что тока в цепи сетки нет (этого мы всегда можем достичь, подав достаточно большое отрицательное напряжение смещения на сетку) и что напряжение на аноде не изменяется при изменении величины анодного тока i_a. Это значит, что мы пренебрегаем анодной реакцией, т. е. влиянием анодной нагрузки. В случае трехэлектродной лампы это пренебрежение не вполне законно, но в случае пентода анодной реакцией вполне можно пренебречь. Впрочем, и в случае трехэлектродной лампы анодная реакция для рассматриваемого нами вопроса не играет принципиальной роли [1]. Вместе с тем сделанные предположения значительно упростят те расчеты, которые нам придется произвести для рассматриваемой схемы.



Фиг. 10.

Прежде всего нужно установить связь между током i в сеточном контуре и анодным током i_a. Допустим, что в сеточном контуре, настроенном на угловую частоту ω, происходят гармонические колебания с амплитудой I_m и угловой частотой ω, т. е. что ток в сеточном контуре изменяется, например, по закону косинуса:

$$i = I_m \cos \omega t. \qquad (1)$$

[1] При наличии сеточных токов и анодной реакции изменяется характер процессов внутри самой лампы, которых мы не рассматриваем. Влияние сеточных токов и анодной реакции в нашем рассмотрении могло бы быть учтено изменением вида характеристик лампы. Однако эти изменения не играют принципиальной роли.

Реактивное сопротивление конденсатора C для тока этой частоты $X_C = \frac{1}{\omega C}$, и амплитуда напряжения на конденсаторе U_{mC} равна амплитуде тока, текущего через конденсатор, т. е. I_m, умноженной на сопротивление конденсатора (по обобщенному закону Ома $U_m = ZI_m$). Следовательно, амплитуда напряжения на конденсаторе равна:

$$U_{mC} = \frac{I_m}{\omega C}. \qquad (2)$$

Так как конденсатор C включен непосредственно между сеткой и катодом, напряжение на сетке лампы равняется напряжению на конденсаторе, и амплитуда напряжения на сетке определяется тем же выражением:

$$U_{mc} = \frac{I_m}{\omega C}. \qquad (3)$$

Напряжение на сетке изменяется по тому же закону и с той же частотой ω, как и ток в контуре, но по фазе напряжение на конденсаторе сдвинуто относительно тока, текущего через конденсатор, на угол $\frac{\pi}{2}$, и мгновенное значение напряжения на сетке определяется выражением:

$$u_c = \frac{I_m}{\omega C} \sin \omega t. \qquad (4)$$

Мгновенное значение анодного тока i_a, по нашему предположению (поскольку мы пренебрегли анодной реакцией), определяется только мгновенным значением напряжения на сетке. Зная для каждого момента времени величину u_c, мы могли бы по характеристике лампы найти соответствующую величину i_a.

Однако нас интересует не столько сама величина анодного тока, сколько скорость изменения этой величины, и вот почему. Мы должны определить, какую э. д. с. создает в сеточном контуре анодный ток вследствие наличия индуктивной обратной связи. Но, как известно, э. д. с., индуктируемая каким-либо током в цепи, зависит от скорости изменения величины тока. А скорость изменения анодного тока зависит, с одной стороны, от скорости изменения напряжения u_c, т. е. от частоты ω, а с другой стороны, от крутизны характеристики лампы S. Действительно,

чем круче характеристика, тем больше изменяется i_a при данном изменении u_c; другими словами, скорость изменения i_a а следовательно, и э. д. с., создаваемая в контуре обратной связью, пропорциональны крутизне характеристики лампы.

Кроме того, индуктируемая э. д. с. пропорциональна коэффициенту взаимоиндукции M между катушками контура и обратной связи. В конечном счете э. д. с., создаваемая обратной связью в контуре сетки, оказывается прямо пропорциональной амплитуде напряжения на сетке U_{mc}, крутизне характеристики лампы S, коэффициенту взаимоиндукции M и частоте изменений напряжений на сетке ω. Эта э. д. с. будет изменяться по такому же закону, как и ток i_a, и с той же частотой ω. Но так как э. д. с. определяется скоростью изменения тока, то она будет достигать максимальных значений не тогда, когда ток наибольший, а тогда, когда *скорость изменения тока наибольшая.*

При синусоидальном (или косинусоидальном) законе изменения какой-либо величины скорость изменения этой величины наибольшая в те моменты, когда сама величина проходит через нуль (это видно из того, что синусоида имеет наибольшую крутизну в тех местах, где она проходит через нуль). Следовательно, э. д. с. обратной связи проходит через максимум, когда анодный ток проходит через нуль, и, наоборот, э. д. с. проходит через нуль, когда анодный ток проходит через максимум. Это значит, что фаза этой э. д. с. $e_{o.c}$ сдвинута по отношению к фазе анодного тока i_a также на $\frac{\pi}{2}$, т. е. если анодный ток изменяется по закону синуса, то э. д. с., создаваемая обратной связью в колебательном контуре сетки, изменяется по закону косинуса и определяется выражением:

$$e_{o.c} = M\omega S U_{mc} \cos \omega t.$$

Так как $U_{mc} = \frac{I_m}{\omega C}$, то мы можем выразить $e_{o.c}$ через I_m, т. е. через амплитуду тока в колебательном контуре:

$$e_{o.c} = \frac{MSI_m}{C} \cos \omega t. \qquad (5)$$

Заметим кстати, что знак коэффициента взаимоиндукции M может быть как положительным, так и отрицательным. Выбор знака коэффициента взаимоиндукции зависит от выбора тех направлений, которые приняты за положительные направления токов в индуктивно связанных контурах. Знак

коэффициента взаимоиндукции M всегда можно изменить на обратный, переключив концы одной из катушек, между которыми осуществляется индуктивная связь.

Итак, благодаря наличию обратной связи в колебательном контуре создается добавочная э. д. с. $e_{o.c}$, величина которой определяется выражением (5). С другой стороны, в колебательном контуре существует падение напряжения $u_R = Ri$ на сопротивлении R. Так как ток, проходящий через сопротивление R, $i = I_m \cos \omega t$, то падение напряжения на этом сопротивлении:

$$u_R = RI_m \cos \omega t. \qquad (6)$$

В рассматриваемом нами случае по сравнению с контуром без сопротивления действуют еще два новых фактора, именно падение напряжения u_R на сопротивлении R, определяемое выражением (6), и э. д. с. обратной связи $e_{o.c}$, определяемая выражением (5). При этом э. д. с. обратной связи компенсирует падение напряжения на сопротивлении (нас интересует именно этот случай), и значит их совместное действие выражается разностью:

$$u_R - e_{o.c}.$$

Иначе говоря, отличие колебательного контура лампового генератора от колебательного контура без потерь характеризуется величиной

$$u_R - e_{o.c} = \left(R - \frac{MS}{C}\right) I_m \cos \omega t. \qquad (7)$$

Если бы удалось сделать так, чтобы эта величина всегда была равна нулю, то генератор ничем не отличался бы от колебательного контура без потерь. Действительно, если выражение (7) всегда равно нулю, то значит сопротивление в контуре как бы отсутствует, так как оно скомепенсировано действием обратной связи. Другими словами, потери в активном сопротивлении компенсируется той энергией, которая поступает в контур из анодной цепи. Для того чтобы величина (7) все время была равна нулю, нужно, очевидно, чтобы

$$R - \frac{MS}{C} = 0. \qquad (8)$$

Если бы это условие было соблюдено, то колебания, возникшие в контуре генератора, не затухали бы, и генератор вел бы себя как колебательный контур без потерь. Каза-

лось бы, что таким образом можно получить незатухающие колебания. Однако в действительности дело обстоит не так. Как будет показано дальше, осуществить контур без затухания практически невозможно, так как в реальных приборах невозможно в точности соблюсти условия, при которых выражение (8) всегда остается равным нулю.

Поэтому нам необходимо прежде всего выяснить, как будет вести себя ламповый генератор, если величина

$$\left(R - \frac{MS}{C}\right) \qquad (9)$$

не равна нулю.

Значение выражения (9) может изменяться вследствие изменения любой из входящих в него величин R, M, S и C. Поэтому можно различными способами изменять значение выражения (9). Для определенности мы предположим, что изменение значения выражения (9) происходит вследствие изменения M, т. е. вследствие взаимного приближения или удаления катушки обратной связи и катушки колебательного контура.

Величины R и C определяются свойствами колебательного контура, и мы будем их пока считать неизменными. Крутизна характеристики S в рабочей точке и в области, достаточно близкой к этой точке, также постоянна; поэтому для малых амплитуд колебаний мы можем считать ее также величиной неизменной. Итак, будем изменять величину M и посмотрим, как будет изменяться при этом поведение лампового генератора.

Пока M очень мало, второй, отрицательный, член в выражении (9) очень мал; он меньше, чем R, и поэтому все выражение (9) будет положительно, т. е. падение напряжения в сопротивлении будет преобладать над э. д. с. обратной связи, и вместе с тем потери энергии в контуре будут преобладать над той энергией, которая поступает в контур из анодной цепи. Обратная связь будет только отчасти компенсировать потери в сопротивлении.

При увеличении M второй член будет увеличиваться и величина всего выражения (9) будет уменьшаться. При этом все бо́льшую и бо́льшую долю потерь будет компенсировать обратная связь и затухание колебаний в контуре будет уменьшаться.

Наконец, когда M возрастет настолько, что будет соблюдено равенство

$$R = \frac{MS}{C}, \qquad (10)$$

выражение (9) обратится в нуль и, следовательно, сопротивление в контуре будет в точности скомпенсировано— колебания в контуре станут незатухающими. Соответствующее значение обратной связи называется критическим, т. е.

$$M_{кр} = \frac{RC}{S}. \tag{11}$$

Наконец, при дальнейшем увеличении M выражение (9) станет отрицательным. Мы этот последний случай подробно рассмотрим позднее, а пока ограничимся только следующим указанием: если выражение (9) стало отрицательным, то это значит, что э. д. с., создаваемая обратной связью, преобладает над падением напряжения на сопротивлении R и, вместе с тем, поступление энергии из анодной цепи преобладает над потерями энергии в сопротивлении; следовательно, при колебаниях энергия в контуре не только не убывает, но, наоборот, нарастает, и значит, амплитуда колебаний в контуре так же нарастает.

Однако все рассуждение, которое мы провели, нуждается в черзвычайно существенных оговорках, а именно: мы предполагаем, что S — величина постоянная, но это правильно только для данной точки характеристики лампы. Вообще же говоря, от точки к точке крутизна характеристики изменяется. И если мы рассматриваем случай, когда в колебательном контуре есть колебания, то напряжение на сетке все время изменяется и вместе с тем изменяется и положение той точки на характеристике, для которой мы должны определять крутизну. Правда, если амплитуды колебаний очень малы, то точка мало передвигается по характеристике, и в пределах этого малого участка мы можем приблизительно считать характеристику прямолинейной, а крутизну ее — постоянной. Другими словами, наши рассуждения верны только приблизительно и то лишь для случая достаточно малых амплитуд.

Но допустим, что наши рассуждения верны и что характеристика вполне прямолинейна на некотором участке. Можно ли рассчитывать, что в реальном генераторе мы сможем осуществить в точности те условия, при которых соблюдается равенство (10)? Конечно, нет. Ведь достаточно самых небольших изменений, например, в режиме лампы, чтобы крутизна немного изменилась, и величина (9) уже не будет равна нулю; она станет положительной (если S немного уменьшится) или отрицательной (если S немного

возрастет). Точно так же достаточно небольших механических воздействий или изменений температуры, чтобы изменилось, например, значение величины C. Словом, практически мы никогда не можем точно соблюсти условие (10), и колебания в контуре генератора станут либо затухать, либо нарастать.

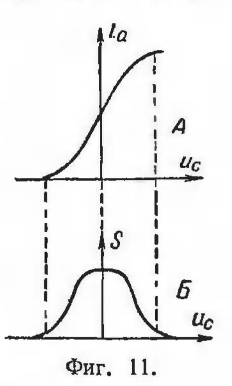
Таким образом, условию (10) не соответствует какой-либо реальный режим в генераторе. Это равенство определяет лишь границу между двумя существенно различными состояниями генератора: одно состояние — это когда небольшие колебания в контуре затухают, а другое — когда эти небольшие колебания нарастают (подчеркиваем, небольшие, потому, что все наше рассуждение, как уже было сказано, верно для небольших амплитуд; что будет происходить при больших амплитудах, мы пока вообще еще не знаем).

Итак, практически осуществить контур, который вел бы себя, как контур без сопротивления, невозможно уже по одному тому, что для этого необходимо иметь лампу с абсолютно прямолинейной характеристикой, контур с абсолютно неизменными емкостью, индуктивностью и сопротивлением и т. д. Иначе говоря, практически невозможно совершенно точно скомпенсировать потери энергии в контуре, так как при такой точной компенсации достаточно самых небольших изменений режима, для того чтобы компенсация была нарушена в ту или другую сторону. Практически можно осуществить либо такой режим, когда энергия, отдаваемая лампой в контур, оказывается немного меньше потерь энергии в контуре, либо такой режим, когда эта подводимая энергия немного превышает потери энергии в контуре. Второй из этих режимов будет рассмотрен позднее, а сейчас остановимся на первом режиме, при котором происходит частичная компенсация затухания в контуре.

Частичная компенсация затухания в контуре широко применяется в регенеративном приемнике. Если бы в регенеративном приемнике мы попытались полностью скомпенсировать затухание контура, т. е. подобрали бы такую обратную связь, чтобы удовлетворилось равенство (10), то при небольших случайных изменениях режима, вызывающих, например, увеличение крутизны характеристики лампы, колебания в контуре начали бы нарастать. Это привело бы к искажениям приема, и поэтому в таком режиме регенеративный приемник обычно не применяют. В действительности обратную связь не доводят до критического значения или, как говорят иначе, приемник не доводят до «порога генерации»,

и, следовательно, обычно регенератор работает в режиме частичной компенсации затухания [1].

Частичная компенсация затухания в контуре приводит как бы к повышению его добротности, в результате чего приемный контур становится более избирательным и более чувствительным. Однако все это правильно только для достаточно малых амплитуд, в пределах которых можно считать характеристику лампы прямолинейной, а крутизну — постоянной. Если же амплитуды колебаний, создаваемых в контуре приходящими сигналами, таковы, что они выходят за эти пределы, то мы должны уже считаться с тем, что характеристика не прямолинейна и что крутизна ее изменяется.



Фиг. 11.

Проследим, какое влияние оказывает это обстоятельство на свойства регенератора. Для этого нужно посмотреть, как изменяется крутизна характеристики при изменении напряжения на сетке. При характеристике обычного вида, изображенной на фиг. 11,*А*, в средней части крутизна ее наибольшая, а по обе стороны от средней части постепенно уменьшается — приблизительно одинаково как в сторону положительных, так и в сторону отрицательных напряжений на сетке. Там, где анодный ток спадает до нуля или достигает насыщения, крутизна характеристики спадает до нуля. Графически эта зависимость крутизны характеристики от напряжения на сетке изображена на рис. 11,*Б*. Но чем больше амплитуды колебаний, тем дальше заходят напряжения в области малых крутизн. А чем меньше крутизна характеристики, тем меньшая часть потерь энергии в контуре будет компенсироваться, так как второй член в выражении (9) будет уменьшаться, и тем меньше будет заметно кажущееся увеличение добротности колебательного контура, обусловленное действием обратной связи. Следовательно, чем больше амплитуда колебаний в контуре регенератора, т. е. чем сильнее приходящие сигналы, тем меньше чувствительность и избирательность регенератора. Этим и объясняется то, что регенератор дает

[1] В некоторых специальных случаях, например, при приеме телеграфных сигналов, регенератор работает при обратной связи, превышающей критическую. Обратная связь, в некоторые моменты превышающая критическую, применяется также в одной из разновидностей регенеративного приемника, в так называемом сверхрегенераторе.

хорошие результаты только при приеме слабо слышимых станций. При приеме громких станций регенератор обладает не только малой чувствительностью, но и слабой отстройкой, другими словами, чем сильнее сигналы мешающей станции, тем меньше избирательность регенератора.

Представление о том, что обратная связь в той или иной мере компенсирует сопротивление контура, можно развивать еще дальше. Можно сказать, что если в отсутствии обратной связи сопротивление контура было равно R, то при наличии обратной связи контур ведет себя так, как будто он обладает меньшим сопротивлением:

$$r=\left(R-\frac{MS}{C}\right). \qquad (12)$$

Эту величину часто называют эквивалентным сопротивлением контура с обратной связью. При связи, равной критической, эквивалентное сопротивление обращается в нуль.

Если напряжение в контуре генератора так велико, что оно выходит за пределы прямолинейной части характеристики, то S изменяется, и эквивалентное сопротивление r также изменяется с изменением напряжения. В таких случаях часто пользуются представлением о среднем эквивалентном сопротивлении, т. е. о том среднем значении переменной величины r, которое соответствует заданным пределам изменений напряжения на сетке. Если в рабочей точке крутизна наибольшая и в обе стороны от нее уменьшается, то, очевидно, r наименьшее в рабочей точке и увеличивается по мере увеличения напряжения, вместе с тем увеличивается и среднее эквивалентное сопротивление. Например, в рассмотренном только что случае регенератора, находящегося под действием сильных сигналов, среднее эквивалентное сопротивление колебательного контура регенератора увеличивается по мере увеличения амплитуды напряжений на сетке регенератора. Уменьшение чувствительности и избирательности регенеративного приемника по отношению к сильным сигналам можно объяснить как результат увеличения среднего эквивалентного сопротивления при увеличении амплитуды сигналов.

8. ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ И ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Прежде чем перейти к следующему вопросу о поведении регенератора при связи, большей, чем критическая, рассмотрим более детально вопрос о «направлении» обратной связи.

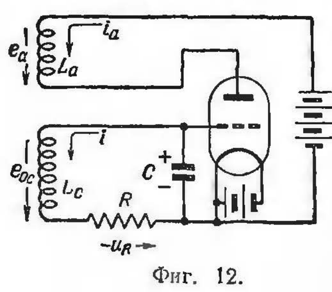
Мы уже отмечали (§ 5), что при соответствующем выборе направления обратной связи, например направления включения катушки обратной связи, происходит компенсация затухания, т. е. получается положительная обратная связь. Наоборот, если мы переключим концы катушки обратной связи, то изменится и направление э. д. с. обратной связи и эта отрицательная обратная связь будет вызывать добавочные потери энергии в контуре и увеличит его затухание. Если при положительной обратной связи потери компенсируются за счет энергии, поступающей из анодной цепи, то при отрицательной обратной связи, наоборот, анодная цепь забирает часть энергии из контура (эта энергия рассеивается в виде тепла на аноде лампы), и в этом случае лампа служит нагрузкой для колебательного контура.

Иначе говоря, при положительной обратной связи э. д. с. обратной связи компенсирует падение напряжения, т. е. их совместное действие определяется их разностью $u_R - e_{o.c}$. Поэтому мы и написали в выражении (7) знак минус и при этом должны считать, что в (7) и во всех последующих выражениях M положительно. Наоборот, при отрицательной обратной связи совместное действие э. д. с. и падение напряжения характеризуются их суммой $u_R + e_{o.c}$; следовательно, в выражении (7) и дальнейших вместо минуса должен был бы стоять плюс. Если бы мы попрежнему писали знак минус, то при отрицательной обратной связи мы должны были считать само M отрицательным. Таким образом, изменение знака обратной связи соответствует изменению знака M.

Следует, однако, специально подчеркнуть, что вопрос о знаке обратной связи вовсе не решается знаком коэффициента взаимоиндукции M. Конечно, при изменении знака коэффициента взаимоиндукции изменяется и знак обратной связи, но не обязательно знак обратной связи совпадает со знаком коэффициента взаимоиндукции. В самом деле, знак обратной связи определяется тем, получает или отдает энергию колебательный контур. Ясно, что это зависит от той реальной связи между фазами тока в колебательном контуре и э. д. с. обратной связи, которая в действительности существует в данной схеме, и никак не зависит от того, какие направления токов в сеточной и анодной цепях мы выбрали за положительные. Между тем знак коэффициента взаимоиндукции зависит именно от выбора этих направлений.

Чтобы пояснить все сказанное и исключить часто возникающие затруднения в вопросе о знаке обратной связи, рассмотрим соотношения между фазами токов и напряжений в конкретной схеме лампового генератора с индуктивной обратной связью.

Для определенности нужно зафиксировать направление витков в двух катушках — сеточной и анодной. Будем считать, что в схеме, изображенной на фиг. 12, обе катушки намотаны в одном направлении, т. е. смежными являются конец анодной катушки и начало сеточной, присоединенные соответственно к аноду и сетке. Далее положим, что в какой-то момент времени конденсатор заряжен так, как указано на фигуре, т. е. на сетку лампы подается положительное напряжение и конденсатор разряжается, т. е. в сеточном контуре ток i проходит в направлении, указанном на рисунке стрелкой. При этом на сопротивлении R существует падение напряжения u_R. В соответствии со сказанным выше, для компенсации потерь нужно, чтобы за счет обратной связи в контуре создавалась э. д. с. $e_{o.c}$ того же направления, что и u_R. Но создается она за счет изменения величины анодного тока. Так как мы рассматриваем момент, когда конденсатор разряжается, то положительное напряжение на сетке уменьшается, и анодный ток i_a падает. При этом направлен он к аноду, т. е. в направлении, указанном на рис. 12 стрелкой (так как направлением тока нужно считать направление, обратное движению электронов). Но если ток, текущий в этом направлении, уменьшается, то э. д. с. самоиндукции e_a, возникающая в анодной катушке, направлена в ту же сторону (э. д. с. самоиндукции направлена всегда навстречу *изменениям тока*); направление e_a в рассматриваемый момент также изображено на фиг. 12 стрелкой. Так как сеточная катушка намотана в ту же сторону, то возникающая в ней э. д. с. обратной связи $e_{o.c}$ имеет ту же полярность, что и e_a (э. д. с. в обеих катушках вызывается изменениями одного и того же магнитного поля), т. е. направлена так, как указано стрелкой на фиг. 12. Мы видим, что направление э. д. с. $e_{o.c}$ и падения напряжения u_R совпадают; следова-



Фиг. 12.

тельно, при том включении катушек, которое указано на фиг. 12, условия компенсации затухания будут выполнены, и мы имеем случай положительной обратной связи. Если же мы переключим концы одной из катушек, то полярность э. д. с. $e_{o.c}$ изменится на обратную и мы будем иметь случай отрицательной обратной связи. Наконец, если мы переключим концы и анодной и сеточной катушек (по сравнению с теми включениями, которые указаны на фиг. 12), то снова получим положительную обратную связь.

Как видим, вопрос о знаке обратной связи решается фактическим направлением токов в катушках и не связан с совершенно условным выбором тех направлений токов, которые считаются положительными.

Что же касается знака M, то, как уже указывалось, только выбрав (совершенно условно) положительные направления токов в контуре и в анодной цепи, можно определить знак M. Когда эти направления выбраны, знак M определяется из того условия, что знак э. д. с., индуктируемой в контуре, должен быть противоположен знаку изменения тока в анодной цепи (так же как и в случае э. д. с. самоиндукции знак э. д. с. противоположен знаку изменения тока).

Например, если мы за положительные направления токов в сеточном контуре и в анодной цепи выберем те направления, в которых фактически текут токи в рассмотренной стадии процесса [1], т. е. направления, указанные на фигуре стрелками при i и i_a, то как нетрудно убедиться, знак изменения i_a отрицателен (так как положительный ток уменьшается), а знак э. д. с. $e_{o.c}$ положителен, так как она направлена в ту же сторону, что и ток, направление которого мы считаем положительным. Следовательно, знаки изменения i и э. д. с. $e_{o.c}$ противоположны. Это значит, что при выбранных нами положительных направлениях токов и при том включении катушек, которое изображено на фиг. 12, M положительно, т. е. знак M совпадает со знаком обратной связи. Но это могло быть и не так, если бы, например, за положительное направление тока в сеточном контуре мы выбрали направление, противоположное направлению стрелки при i. Тогда для случая, изображенного на фиг. 12, M оказалось бы отрицательным, а обрат-

[1] Этот выбор совершенно не обязателен. Мы могли в одной цепи (или в обеих) выбрать за положительное направление противоположное текущему фактически току. Это значило бы, что в рассматриваемой стадии процесса в цепи ток имеет отрицательное значение.

ная связь попрежнему оставалась положительной, ибо от выбора условных положительных направлений токов характер обратной связи, конечно, никак не зависит.

Поскольку выбор знака M не играет никакой роли, мы всегда будем считать M положительным, и, значит, при положительной обратной связи в выражении (9) будет стоять знак плюс, а при отрицательной обратной связи знак минус. Впрочем, случаи отрицательной обратной связи нас интересовать не будут.

9. НАРАСТАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ЛАМПОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ

Рассмотрим теперь поведение лампового генератора при обратной связи, превышающей критическую. Представим себе, что вследствие каких-либо случайных причин в колебательном контуре генератора возник слабый ток I_{m1}, который заряжает конденсатор, и на этом последнем появляется напряжение.

Если бы обратная связь отсутствовала, то процесс протекал бы, как и во всяком колебательном контуре, обладающем сопротивлением. Конденсатор постепенно заряжался бы, а величина тока уменьшалась; в момент, когда величина тока упала бы до нуля, конденсатор оказался бы заряженным до некоторого максимального напряжения U_{m1}. Затем возник бы ток обратного направления и конденсатор начал бы разряжаться; в момент, когда он полностью разрядится, ток обратного направления достигнет максимальной величины I_{m2} и т. д.; словом, в контуре возникли бы колебания.

Вследствие наличия сопротивления в контуре максимальное напряжение U_{m1} оказывается меньше того максимального напряжения U_{m0}, до которого зарядился бы конденсатор при том же начальном токе I_{m1}, если бы сопротивление в контуре отсутствовало, и максимальная величина тока обратного направления I_{m2} оказывается меньше, чем начальная величина тока I_{m1}. Иначе говоря, колебания в контуре были бы затухающими, и случайно возникший в контуре слабый ток в конце концов прекратился бы.

При наличии же обратной связи, превышающей критическую, процесс будет протекать по-иному. Так как обратная связь положительна и превышает критическую, то э. д. с. обратной связи направлена в ту же сторону, в которую течет ток, и по величине превышает падение напря-

жения на сопротивлении. Вследствие этого напряжение U_{m1}, до которого зарядится конденсатор, будет уже не меньше, чем напряжение U_{m0}, до которого он зарядился бы, если бы сопротивление отсутствовало, а больше этой величины. Соответственно и максимальный ток обратного направления I_{m2} окажется не меньше, а больше начального тока I_{m1}. Дальше колебания будут продолжаться, и каждое последующее максимальное значение напряжения на конденсаторе и максимальное значение тока окажутся больше предыдущего. Иначе говоря, колебания в контуре будут не затухать, а нарастать (фиг. 13).

Таким образом, при обратной связи, превышающей критическую, колебательный контур генератора приобретает новые свойства: появление в этом контуре любого сколь угодно малого тока приведет к тому, что к контуре возникнут нарастающие колебания.

Фиг. 13.

Но появление в контуре слабых токов совершенно неизбежно. Не говоря уже о том, что всякие внешние толчки (например, включение анодного напряжения) приводят к появлению слабых токов в колебательном контуре, даже при отсутствии внешних толчков в контуре всегда существуют хаотические, нерегулярные слабые токи.

Причина появления таких токов лежит в самой природе электричества. Дело в том, что свободные электроны во всяком металлическом проводнике совершают нерегулярное тепловое движение (подобно молекулам газа). Если за любой промежуток времени через какое-либо сечение проводника проходит одинаковое количество электронов в одном и в другом направлениях, то ток в проводнике отсутствует. Пока электроны движутся совершенно хаотически (т. е. пока нет электрического поля, вызывающего их регулярное движение), число электронов, проходящих в среднем за какой-либо промежуток времени в обоих направлениях, действительно оказывается одинаковым. Однако, вследствие нерегулярности движения электронов за отдельные короткие промежутки времени число электронов, проходящих через сечение проводника в двух направлениях, часто оказывается неодинаковым, и, следовательно, в проводнике всегда существуют очень слабые нерегулярные электрические токи.

Наличие таких токов в колебательном контуре генератора при обратной связи, превышающей критическую, как мы видели, приводит к возникновению в контуре нарастающих колебаний. Поэтому, когда обратная связь превышает критическую, то даже при отсутствии каких-либо внешних толчков в генераторе неизбежно возникают нарастающие колебания, т. е. происходит самовозбуждение колебаний.

Если в системе происходит самовозбуждение колебаний, то это значит, что система, находящаяся в состоянии покоя и предоставленная самой себе, не будет оставаться в этом состоянии. Иначе говоря, состояние покоя в рассматриваемой системе оказывается неустойчивым. Таким образом, самовозбуждение колебаний системы тесно связано с неустойчивостью состояния равновесия в ней.

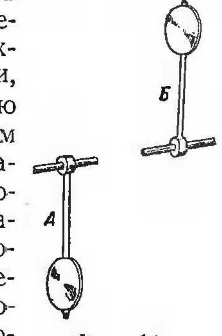
Чтобы пояснить сказанное, мы рассмотрим на механической модели вопрос об устойчивости или неустойчивости состояний равновесия. Такой моделью нам послужит тот же маятник.

Если механическая система находится в состоянии покоя, т. е. скорость ее равна нулю, и при этом отсутствуют силы, которые могли бы ей сообщить скорость, то такое состояние системы называется состоянием равновесия. Для маятника, очевидно, существуют два состояния равновесия — первое, когда он покоится в самой нижней точке (фиг. 14,*А*) и второе, когда он покоится в самой верхней точке (фиг. 14,*Б*). В обоих случаях сила тяжести, действующая на маятник, не может сообщить ему скорости. В первом случае она только растягивает стержень маятника, а во втором только его сжимает. Однако между этими двумя состояниями равновесия есть существенная разница, которая заключается в том, что одно из этих состояний равновесия устойчиво, а другое неустойчиво.

Действительно, если мы немного отклоним или слегка толкнем маятник, находящийся в положении *А* (фиг. 14), то он начнет совершать колебания вокруг этого положения. Эти колебания вследствие наличия трения будут затухать, и, значит, по прошествии некоторого промежутка времени маятник снова вернется в отвесное положение, из которого он был отклонен. Если бы трение отсутствовало, то колебания бы не затухли, но и в этом случае при малом начальном отклонении от положения равновесия отклонения при колебаниях также были бы малы. Маятник никогда не уходил бы далеко от положения равновесия, если начальное

отклонение невелико. Такое состояние равновесия, когда при небольшом начальном отклонении или слабом начальном толчке маятник никогда не уходит далеко от положения равновесия, и называется устойчивым состоянием равновесия.

Совсем иначе обстоит дело с состоянием равновесия, соответствующим положению *Б* на фиг. 14. Если мы отклоним маятник даже совсем немного или совсем слабо его толкнем, он упадет вниз и будет совершать большие колебания около нижнего положения равновесия. Когда эти колебания затухнут, маятник окажется в нижнем положении, соответствующем устойчивому состоянию равновесия. Иначе говоря, при очень малом начальном отклонении или очень слабом начальном толчке маятник уйдет далеко от того положения, в котором он находился в начале. Такое состояние равновесия, при котором достаточно самого небольшого отклонения или самого слабого толчка для того, чтобы система ушла далеко от положения, соответствующего данному состоянию равновесия, называется неустойчивым состоянием равновесия. Если система находится в неустойчивом состоянии равновесия, то какое угодно малое отклонение от состояния равновесия в дальнейшем будет нарастать. Легко видеть, что в зависимости от того, устойчиво или неустойчиво состояние равновесия, поведение системы будет совершенно различным.



Фиг. 14.

Рассматривая какую-либо реальную систему, мы никогда не можем считать, что она находится в состоянии абсолютного покоя. На всякую систему всегда действуют хотя бы очень слабые толчки. Как бы мы хорошо ни защитили систему от толчков извне, в ней самой всегда будут возникать очень слабые движения. В механических системах эти движения неизбежны хотя бы потому, что механические системы состоят из отдельных частиц — молекул и атомов, — которые не находятся в состоянии покоя, а совершают хаотическое движение, и поэтому все тело, состоящее из этих хаотически движущихся атомов, также совершает хотя и очень слабое, но принципиально неустранимое нерегулярное движение. Если такие слабые движения совершает система, находящаяся в состоянии устойчивого равновесия, то она не уйдет сколько-нибудь далеко от положения равновесия. Она будет совершать очень малые движения около поло-

жения равновесия, и практически мы можем считать, что система находится в состоянии равновесия.

Если же состояние равновесия неустойчиво, то эти малые движения, как мы видели, приведут к тому, что система уйдет далеко от положения, соответствующего состоянию неустойчивого равновесия. А так как слабые движения в системе принципиально неустранимы, то значит ни одна реальная система никогда не может сколько-нибудь долго оставаться в положении, соответствующем состоянию неустойчивого равновесия. Состояние неустойчивого равновесия не есть состояние покоя для реальной системы.

Вернемся теперь к вопросу о состоянии равновесия электрических систем и, в частности, лампового генератора. В электрических системах состояния равновесия — это такие состояния, когда токи в цепях отсутствуют, а электрические силы (напряжения) в цепях либо отсутствуют, либо уравновешивают друг друга. В частности, обычный колебательный контур находится в состоянии равновесия, если ток в этом контуре равен нулю и напряжение на конденсаторе также равно нулю.

В случае лампового генератора состояние равновесия колебательного контура определяется теми же условиями. Так как напряжение на конденсаторе контура (в той схеме генератора, которую мы все время рассматриваем) равно напряжению на сетке лампы, то, значит, в состоянии равновесия рабочее напряжение на сетке должно быть равно нулю. Следовательно, состоянию равновесия генератора как раз соответствует рабочая точка $u_c = 0$ (фиг. 15,*А*). Хотя в анодной цепи при этом течет ток I_{a0}, но этот ток постоянный, поэтому он не создает э. д. с. в колебательном контуре.

Мы можем исключить ток I_{a0}, т. е. считать начальное значение анодного тока I_{a0} за нулевое и отсчитывать анодный ток от этого значения, считая его положительным, если он превышает значение I_{a0}, и отрицательным, если он меньше этой величины. При таком способе отсчета мы принимаем во внимание только переменную составляющую анодного тока i_a. При этом характеристика лампы расположится так, как указано на фиг. 15,*Б*, и состоянию равновесия будет соответствовать начало координат, т. е. точка O, в которой $u_c = 0$ и $i_a = 0$. Такое перенесение начала координат в рабочую точку упрощает дальнейшее рассмотрение.

Для рассматриваемого лампового генератора существует только одно состояние равновесия, соответствующее точке $u_c = 0$ и $i_a = 0$. Вообще же в электрических схемах, так же как, например, для маятника, может существовать не одно, а несколько состояний равновесия. Эти состояния равновесия могут быть либо устойчивы, либо неустойчивы, и в зависимости от этого электрическая схема в различных случаях будет вести себя по-разному. Так как в электрических цепях, как уже указывалось, всегда существуют очень слабые, нерегулярные, но принципиально неустранимые токи, то в случае неустойчивого состояния равновесия эти токи будут нарастать, т. е. реальная электрическая система никогда не может оставаться в состоянии неустойчивого равновесия. Именно это имеет место в ламповом генераторе, когда обратная связь превышает критическую.

Фиг. 15.

Пока обратная связь не превышает критической, состояние равновесия генератора устойчиво, и возникающие в нем слабые токи не нарастают. Генератор практически остается в состоянии равновесия. Если же обратная связь превышает критическую, то его состояние равновесия оказывается неустойчивым, слабые начальные токи, всегда существующие в его колебательном контуре, начинают нарастать и генератор не остается в состоянии равновесия. Иными словами, неустойчивость состояния равновесия при обратной связи, превышающей критическую, и является причиной самовозбуждения колебаний в генераторе.

Неустойчивое состояние равновесия лампового генератора при обратной связи, превышающей критическую, в некотором смысле аналогично состоянию равновесия маятника, находящегося в верхнем отвесном положении, так как и в том, и в другом случае система не остается в состоянии равновесия. Однако только в этом состоит сходство между обоими случаями. Поведение же лампового генератора при обратной связи, превышающей критическую, существенно отличается от поведения маятника, находящегося в верхнем положении. В то время как маятник сразу уходит из верхнего положения и затем совершает колебания около другого,

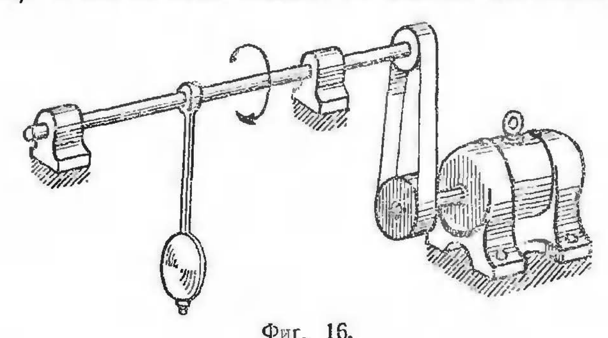
нижнего положения, в ламповом генераторе колебания нарастают постепенно и происходят они около рабочей точки, т. е. около того же самого неустойчивого положения [1].

Это различие обусловлено тем, что в случае лампового генератора и в случае маятника, находящегося в верхнем отвесном положении, самый характер неустойчивости состояния равновесия, по существу, различен. Поэтому обычный маятник, находящийся в верхнем отвесном положении, не может служить механической моделью лампового генератора при обратной связи, превышающей критическую. Такой моделью может служить маятник несколько более сложного устройства.

Рассмотрение этой более сложной модели потребует от читателя затраты времени и внимания, но мы надеемся, что эта затрата окупится той наглядностью, которую приобретают наши представления об электрических явлениях, когда они поясняются на механических моделях.

10. МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛАМПОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Механической моделью лампового генератора может служить маятник, подвешенный на вращающемся валу (фиг. 16). Отличие этой модели от модели обычного маят-



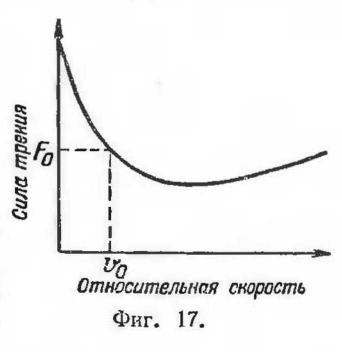
Фиг. 16.

ника, которой мы пользовались, состоит в том, что вал, на который надета втулка, не неподвижен, а вращается (например, с помощью электродвигателя) с некоторой постоянной скоростью. Такой маятник был впервые предложен и

[1] Правда, в ламповом генераторе при сильной обратной связи может происходить очень быстрое нарастание колебаний, т. е. генератор сразу уходит далеко от положения равновесия, но все же колебания происходят около этого положения, а не около другого, как в случае маятника.

изучен выдающимся русским ученым Н. Е. Жуковским и поэтому называется маятником Жуковского.

Чтобы учесть те изменения, которые вносит вращение оси, нужно рассмотреть силы трения между вращающейся осью и втулкой. Сила трения между двумя поверхностями зависит от целого ряда обстоятельств — свойств поверхностей, давления между ними, характера смазки и т. д. Но при всех данных условиях сила трения, кроме того, обычно зависит и от относительной скорости между поверхностями [1]. Если, не изменяя никаких условий, мы будем измерять зависимость силы трения от относительной скорости между трущимися поверхностями, то получим некоторую определенную зависимость, которую можно изобразить графически в виде характеристики трения. В некоторых случаях (для некоторых материалов при соответствующей их обработке) эта характеристика имеет падающий участок, т. е. в некоторой области изменения скоростей сила трения уменьшается с увеличением скорости. Соответствующая этому случаю характеристика силы трения приведена на фиг. 17.



Фиг. 17.

Как же влияет на поведение маятника наличие такой силы трения между втулкой и вращающимся валом?

Если маятник неподвижен, то на него действует сила трения, соответствующая относительной скорости движения вала и втулки, т. е. скорости движения вала, поскольку втулка неподвижна. Эта сила трения направлена в сторону вращения вала и стремится повернуть маятник в ту же сторону. Поэтому нижнее отвесное положение уже не будет соответствовать состоянию равновесия, так как в этом положении на маятник будет действовать ничем не уравновешенная сила трения. Эта сила отклонит маятник от отвесного положения на некоторый угол α (фиг. 18), и это смещенное положение, в котором сила тяжести, действующая на маятник, уравновесит действующую на него силу трения,

---

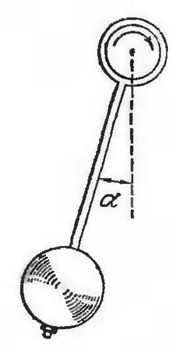
[1] Сила трения зависит не от абсолютной скорости каждой из трущихся поверхностей, а от относительной скорости между поверхностями. Это значит, что если обе поверхности движутся, то сила трения зависит от разности скоростей обеих поверхностей.

будет соответствовать состоянию равновесия в том случае, когда вал вращается.

Посмотрим, будет ли это состояние равновесия устойчиво.

Мы знаем, как подойти к решению этого вопроса. Нужно рассмотреть, какие силы возникнут, если маятник начнет двигаться в каком-либо направлении.

Положим, что маятник начал двигаться, т. е. приобрел некоторую скорость, в направлении движения вала, т. е. на нашем рисунке влево. Так как маятник движется в том же направлении, что и вал, то относительная скорость вала и втулки уменьшается (втулка догоняет вал). И если при уменьшении скорости сила трения возрастает, то она окажется больше, чем при покоящемся маятнике. Эта возросшая сила трения заставит маятник уходить еще дальше влево, т. е. маятник будет удаляться от положения равновесия.



Фиг. 18.

Такой же результат получится, если начальная скорость направлена в сторону, противоположную движению маятника, т. е. маятник начал двигаться вправо. В этом случае относительная скорость вала и втулки будет больше, чем для покоящегося маятника, и если сила трения уменьшается при увеличении скорости, то она окажется меньше, чем в начальный момент, и маятник будет уходить еще дальше вправо, т. е. опять-таки удаляться от положения равновесия.

Следовательно, если под действием случайных причин маятник начнет двигаться, то в обоих случаях сила трения будет заставлять его удаляться от положения равновесия. А это значит, что в рассматриваемом случае состояние равновесия неустойчиво.

Неустойчивость состояния равновесия обусловлена тем, что с увеличением относительной скорости сила трения уменьшается, т. е. характеристика трения имеет падающий участок, и что на этом падающем участке лежит та относительная скорость v_0 (рис. 17), которая соответствует неподвижному маятнику, т. е. скорость, с которой движется поверхность вала относительно втулки, когда эта последняя неподвижна.

Если бы скорость вала имела значение, соответствующее не падающему, а поднимающемуся участку характеристики

силы трения, то получилась бы обратная картина. В самом деле, на поднимающемся участке сила трения растет со скоростью. Поэтому при движении маятника в сторону движения вала (т. е. влево) относительная скорость вала и втулки уменьшилась бы и сила трения также уменьшилась бы. Это уменьшение силы трения привело бы к тому, что маятник под действием силы тяжести начал бы двигаться вправо, т. е. возвращался бы к положению равновесия. Наоборот, если бы случайно возникло движение маятника вправо, т. е. в направлении, обратном движению вала, то относительная скорость возросла бы и вместе с тем возросла бы и сила трения. Она заставила бы маятник двигаться влево, т. е. опять-таки возвращаться к положению равновесия. Следовательно, на поднимающемся участке характеристики силы трения состояние равновесия маятника было бы устойчивым.

Итак, маятник на вращающемся валу, скорость которого подобрана так, что она соответствует падающему участку характеристики силы трения, оказывается в неустойчивом равновесии. В этом положении маятник не останется и неизбежно уйдет из него.

Что же будет происходить с маятником, когда он уйдет из положения, соответствующего состоянию равновесия? Положим для определенности, что маятник ушел в сторону вращения вала, т. е. влево. Маятник не может уйти очень далеко, если сила трения вообще невелика (при любых скоростях). Действие силы тяжести, увеличивающееся по мере увеличения отклонения маятника, при каком-то отклонении маятника начнет преобладать над силой трения. Тогда движение маятника начнет замедляться и в конце концов маятник остановится в некотором новом отклоненном положении.

Но если маятник остановился, то относительная скорость снова станет большой. Сила трения вернется к прежнему меньшему значению, и уже не сможет удержать маятник в этом сильно отклоненном положении. Он начнет снова двигаться к положению равновесия. Так как при этом маятник движется навстречу валу, то относительная скорость будет велика, а сила трения мала. Поэтому маятник пройдет через положение, соответствующее состоянию равновесия, но все же сила трения в какой-то момент начнет его тормозить и он остановится.

Повторяя прежние рассуждения, мы убедимся, что и в этом положении маятник не останется, а начнет двигать-

ся к положению равновесия и пройдет через него, а дальше картина будет повторяться. Следовательно, маятник будет совершать колебания около положения равновесия.

Нетрудно убедиться, что эти колебания должны нарастать.

В самом деле, когда маятник движется в ту же сторону, что и вал, относительная скорость втулки и вала меньше, а сила трения все время больше, чем когда маятник движется против вала (т. е. когда относительная скорость больше).

Но когда маятник и вал движутся в одну сторону, то вал помогает маятнику, он сообщает ему некоторую энергию, когда же маятник движется против вала, то движение вала мешает маятнику, — вал отбирает у маятника некоторое количество энергии. И так как сила трения в первом случае больше, чем во втором, то вал помогает маятнику больше, чем мешает.

Поэтому в конечном счете за период вал передает маятнику некоторое количество энергии (ясно, откуда берется эта энергия — маятник ее получает от того двигателя, который приводит вал в движение). Значит, энергия маятника, а также и амплитуда его колебаний должны нарастать. Причина этого нарастания, как мы убедились, состоит в том, что сила трения уменьшается при увеличении скорости, т. е. что характеристика трения является падающей. Поэтому пока при колебаниях маятника изменения относительной скорости вала и втулки не выходят за пределы падающего участка характеристики трения, колебания маятника должны нарастать.

Таким образом, в случае падающей характеристики трения имеет место самовозбуждение колебаний маятника Жуковского, и этот маятник представляет собой механическую аналогию лампового генератора с обратной связью, превышающей критическую. Эту аналогию можно продолжить, если воспользоваться представлением об эквивалентном сопротивлении.

11. ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ТРЕНИЕ И ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

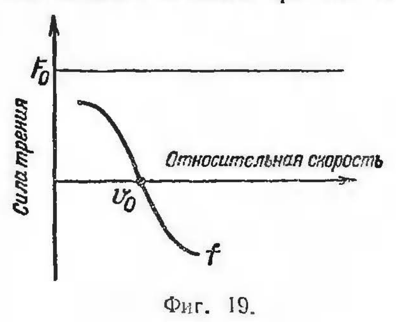
Как мы уже указывали, колебательный контур лампового генератора можно рассматривать как контур, сопротивление которого изменяется благодаря действию обратной связи.

Эквивалентное сопротивление контура

$$r=\left(R-\frac{MS}{C}\right),$$

и, следовательно, при обратной связи, превышающей критическую, т. е. величину $M_{кр}=\frac{RC}{S}$, эквивалентное сопротивление оказывается отрицательным. Но при обратной связи, превышающей критическую, состояние равновесия оказывается неустойчивым, и, значит, отрицательное эквивалентное сопротивление соответствует неустойчивому состоянию равновесия генератора. При этом имеет место самовозбуждение колебаний.

С другой стороны, самовозбуждение колебаний маятника Жуковского имеет место на падающем участке характеристики трения. На этом участке изменение силы трения по знаку обратно изменению скорости: когда скорость возрастает, т. е. ее изменение положительно, то сила трения уменьшается, т. е. ее изменение отрицательно. Поэтому можно считать, что сила трения на падающем участке характеристики состоит из двух составляющих: во-первых, некоторой постоянной составляющей силы трения F_0, которая определяется величиной относительной скорости между валом и втулкой v_0, соответствующей случаю, когда маятник покоится, и некоторой переменной составляющей силы трения f, зависящей от скорости маятника (фиг. 19).



Фиг. 19.

При этом, когда маятник движется в ту же сторону, что и вал, т. е. относительная скорость между валом и втулкой уменьшается, эта переменная составляющая силы трения направлена в ту же сторону, что и постоянная составляющая силы трения F_0, т. е. направлена в сторону движения маятника; когда маятник движется навстречу валу и относительная скорость между валом и втулкой увеличивается, переменная составляющая силы трения направлена навстречу постоянной составляющей силы трения F_0, т. е. опять в сторону движения маятника. Иначе говоря, переменная составляющая силы трения f в случае падающей

характеристики всегда направлена в ту сторону, куда движется маятник, в то время как обычно сила трения направлена навстречу движению.

Легко видеть, что в случае поднимающейся характеристики трения переменная составляющая силы трения имела бы направление, обратное тому, которое она имеет в случае падающей характеристики, т. е. была бы, как обычно, направлена навстречу движению маятника. Если эту обычную силу трения, направленную навстречу движению, называть положительным трением, то переменную составляющую силы трения на падающем участке характеристики, направленную в ту же сторону, куда происходит движение, естественно называть отрицательным трением. Именно наличием отрицательной переменной составляющей силы трения на падающем участке характеристики и обусловлены неустойчивость состояния равновесия маятника и самовозбуждение его колебаний.

В самом деле, постоянная составляющая силы трения вообще никак не может сказаться на устойчивости состояния равновесия и самовозбуждения колебаний. Ведь постоянная сила трения одинаково помогает маятнику при его движении в сторону вала и мешает при движении против вала (так как величина ее не зависит от скорости) и поэтому не может ни увеличить, ни уменьшить энергии начальных колебаний маятника. Переменная же составляющая силы трения, если она все время направлена в ту же сторону, куда движется маятник, все время помогает его движению, что приводит к нарастанию колебаний маятника.

Из сказанного уже ясно выступает аналогия между поведением лампового генератора при обратной связи, превышающей критическую, и маятника Жуковского при падающей характеристике трения. Они ведут себя одинаково именно потому, что эквивалентное сопротивление в первом случае и переменная составляющая силы трения во втором отрицательны. Эту аналогию можно еще более углубить.

Если ограничиться небольшим отрезком падающего участка характеристики, то его можно считать прямолинейным. А это значит, что зависимость величины переменной составляющей силы трения f от скорости v можно выразить так:

$$f = -kv,$$

где k — постоянная (в пределах прямолинейного участка характеристики) величина, называемая коэффициентом трения.

Знак «—» в приведенном выражении поставлен для того, чтобы при положительном трении, когда сила трения направлена навстречу скорости, а значит f и v должны быть разных знаков, коэффициент трения k был бы положителен. Наоборот, при отрицательном трении, когда сила трения и скорость направлены в одну сторону, они должны быть одного знака, т. е. коэффициент трения k будет отрицателен.

Зная выражение для переменной составляющей силы трения, мы можем подсчитать механическую работу, совершаемую силой трения. Постоянная составляющая силы трения, как было указано, одинаково помогает маятнику в течение одного полупериода и мешает в течение другого, т. е. совершает положительную работу в течение одного полупериода и такую же отрицательную работу в течение другого полупериода, а в среднем за период ее работа равна нулю. Поэтому вся работа, совершаемая силой трения за период, определяется только переменной составляющей этой силы.

Работа, совершаемая какой-либо силой, как известно, равна произведению из силы на путь, пройденный телом, на которое эта сила действует. Если маятник движется со скоростью v, то за малый элемент времени Δt он проходит путь $\Delta S = v\Delta t$, и сила трения f совершает при этом работу:

$$\Delta A = f\Delta S = (-kv)\,v\Delta t = -kv^2\Delta t,$$

т. е. энергия системы изменяется на величину

$$\Delta W = -kv^2\Delta t. \qquad (13)$$

Если коэффициент трения положителен, то работа силы трения отрицательна. Это значит, что изменение энергии тоже отрицательно, т. е. энергия системы уменьшается: на преодоление силы трения затрачивается часть энергии самой системы (эта энергия рассеивается в виде тепла). Наоборот, если коэффициент трения отрицателен, то работа сил трения положительна, и изменение энергии положительно, т. е. за счет работы силы трения увеличивается энергия системы.

С другой стороны, как мы видели (§ 7), в колебательном контуре, обладающем сопротивлением R, за время Δt рассеивается энергия

$$Ri^2\Delta t.$$

В случае лампового генератора вместо активного сопротивления R нужно брать эквивалентное сопротивление колебательного контура:

$$r = R - \frac{MS}{C}.$$

Тогда рассеиваемая энергия равна $ri^2\Delta t$, и значит, энергия системы изменяется на величину:

$$\Delta W = -ri^2\Delta t \qquad (14)$$

(знак минус взят потому, что в случае, когда выражение для рассеиваемой энергии положительно, энергия системы уменьшается, т. е. ее изменение отрицательно). Если r отрицательно, то ΔW положительно, т. е. энергия системы увеличивается.

Из сопоставления выражений (13) и (14) сразу видно, что с точки зрения изменений энергии системы коэффициент трения в механических системах играет такую же роль, какую играет сопротивление в электрических системах.

Теперь ясно, почему неустойчивость и самовозбуждение колебаний в обоих случаях связаны именно с отрицательным значением коэффициента трения или эквивалентного сопротивления. Ведь величины v^2 и i^2 всегда положительны, независимо от направления скорости и тока. Поэтому, пока k или r положительны, ΔW отрицательно, т. е. энергия системы уменьшается. Но если k или r становятся отрицательными, то ΔW становится положительным, т. е. система не расходует, а получает некоторую энергию и за счет этой энергии происходит нарастание колебаний. Конечно, это возможно только в том случае, если существует какой-либо источник, из которого поступает энергия в систему (в случае маятника Жуковского таким источником является двигатель, вращающий вал, а в случае генератора — анодная батарея или выпрямитель).

Но ясно, что эквивалентное сопротивление системы (или коэффициент трения) не может оставаться отрицательным при сколь угодно больших значениях тока (или скорости), ибо это значило бы, что мощность, поступающая в систему из источника, может быть как угодно велика. Поэтому во всякой реальной системе эквивалентное сопротивление

(или коэффициент трения) может иметь отрицательные значения только в некоторой ограниченной области токов (или скоростей). В обоих рассмотренных случаях в этом легко убедиться непосредственно. Характеристика лампы всегда имеет крутизну, убывающую при больших напряжениях на сетке. Поэтому, если в области, где крутизна велика, значение эквивалентного сопротивления $r = R - \frac{MS}{C}$ и оказалось отрицательным, то при больших напряжениях на сетке, когда S мало, оно обязательно станет положительным.

Точно так же характеристика трения только в ограниченной области скоростей является падающей, а при дальнейшем увеличении скорости она начинает подниматься, и коэффициент трения становится положительным. Иначе говоря, реальные системы не могут обладать постоянным отрицательным эквивалентным сопротивлением или постоянным отрицательным коэффициентом трения. Эквивалентное сопротивление или коэффициент трения могут иметь постоянное отрицательное значение только в некоторой ограниченной области токов или скоростей. Между тем, как мы видели, при отрицательном эквивалентном сопротивлении или отрицательном коэффициенте трения колебания в системе все время будут нарастать, и, значит, система неизбежно выйдет за пределы той области, в которой эквивалентное сопротивление или коэффициент трения можно считать постоянными.

Поскольку все наше предыдущее рассмотрение относилось к случаю, когда эквивалентное сопротивление или коэффициент трения отрицательны, но постоянны, мы с помощью этого рассмотрения ничего не можем сказать о поведении системы после того, как она вышла за пределы указанной выше области. Чтобы определить дальнейшее поведение системы, требуется специальное рассмотрение.

12. УСТАНОВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ

Мы убедились в том, что в ламповом генераторе при обратной связи, превышающей критическую, т. е. при условии, что $\frac{MS}{C}$ больше R, состояние равновесия оказывается неустойчивым, и в контуре генератора возникают нарастающие колебания. Скорость нарастания колебаний опреде-

ляется тем, насколько увеличивается энергия в колебательном контуре за период, т. е. насколько энергия, поступающая за счет обратной связи из анодной цепи лампы, превышает потери энергии в самом контуре. Чем больше это превышение, т. е. чем больше по абсолютной величине отрицательное эквивалентное сопротивление

$$r = \left(R - \frac{MS}{C}\right),$$

тем быстрее происходит нарастание колебаний.

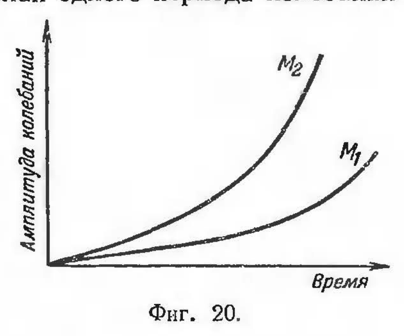
В выражении для эквивалентного сопротивления величины R, M и C обычно не зависят от напряжений и токов в контуре, и при рассмотрении вопроса о нарастании колебаний эти величины мы считаем постоянными[1]. Крутизна же характеристики S в разных точках может быть различной и, следовательно, зависит от напряжения на сетке лампы, а значит, и от напряжения на конденсаторе контура. Поэтому и r есть величина, вообще говоря, переменная, зависящая от напряжения на сетке лампы.

Поскольку при колебаниях в контуре генератора напряжение на сетке все время изменяется, то и значение r при колебаниях также все время изменяется. И только пока амплитуды колебаний еще малы, так что напряжение на сетке не выходит за пределы прямолинейной части характеристики, крутизна ее, а значит, и величина r является постоянной и притом отрицательной, если обратная связь превышает критическую. Поэтому, пока амплитуды колебаний еще малы, за каждый период происходит увеличение энергии колебаний на одну и ту же о т н о с и т е л ь н у ю в е л и ч и н у. Иначе говоря, амплитуды колебаний возрастают по геометрической прогрессии. При этом относительное увеличение амплитуды колебаний за период, т. е. знаменатель геометрической прогрессии тем больше, чем больше абсолютная величина r. Поэтому изменяя, например, значение M, т. е. величину обратной связи, мы изменяем значение r, а вместе с тем и скорость нарастания колебаний. На фиг. 20 изображены кривые нарастания колебаний в генераторе в области малых амплитуд при двух различных значениях обратной связи, причем M_2 больше чем M_1.

---

[1] В некоторых специальных случаях R, M и C могут зависеть от напряжений и токов в контуре; так, например, в генераторе с термистором R зависит от амплитуды тока в контуре. Мы, однако, таких случаев рассматривать не будем.

Когда амплитуда нарастающих колебаний увеличится настолько, что напряжение на сетке начнет выходить за пределы прямолинейной части характеристики, крутизна характеристики, а значит, и эквивалентное сопротивление r перестает быть величиной постоянной. При этом значение S и r изменяется уже в пределах одного периода колебаний (так как напряжение на сетке в течение периода изменяется в пределах, выходящих за границы прямолинейного участка характеристики). Характер тех изменений, которые претерпевает величина S в течение одного периода колебаний, зависит от того, как изменяется крутизна характеристики в обе стороны от рабочей точки.



Фиг. 20.

Мы пока рассмотрим только простейший, но весьма часто встречающийся случай, когда рабочая точка расположена в середине прямолинейного участка характеристики. С этим случаем мы уже сталкивались в § 7.

Как было показано, если рабочая точка лежит в середине прямолинейного участка характеристики, то крутизна ее убывает примерно одинаково в обе стороны от рабочей точки. Эта зависимость крутизны характеристики от напряжения на сетке была приведена на фиг. 11.

Итак посмотрим, как будет вести себя ламповый генератор после того, как колебания возросли настолько, что напряжения на сетке стали выходить за пределы прямолинейной части характеристики и заходить в области, где крутизна характеристики уменьшается.

Соотношение между энергией, поступающей в колебательный контур за счет обратной связи, и потерями в самом контуре попрежнему определяется абсолютной величиной эквивалентного сопротивления:

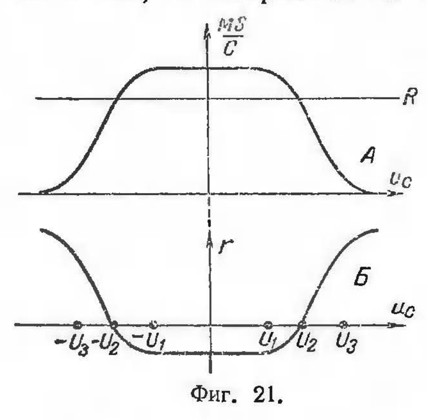
$$r = R - \frac{MS}{C}.$$

Зависимость этой величины от напряжения на сетке удобно проследить с помощью следующего графика (фиг. 21).

Изобразим на графике (рис. 21,A) зависимость величины $\frac{MS}{C}$ от напряжения на сетке. Так как M и C мы считаем

постоянными, то зависимость величины $\frac{MS}{C}$ будет иметь такой же вид, как и зависимость крутизны от напряжения на сетке, т. е. кривая $\frac{MS}{C}$ будет иметь такой же вид, как и кривая S на фиг. 11,*Б*.

Далее отложим на графике величину R. Так как она постоянна, то изобразится на графике горизонтальной прямой (фиг. 21,*А*). А величина r, представляющая собой разность величин $\frac{MS}{C}$ и R, изобразится на графике разностью ординат прямой R и кривой $\frac{MS}{C}$, т. е. разностью вертикальных отрезков от горизонтальной оси соответственно до прямой R и до кривой $\frac{MS}{C}$.



Фиг. 21.

Иначе говоря, зависимость величины r от напряжения на сетке изобразится той же кривой $\frac{MS}{C}$, но перевернутой и смещенной вниз на величину R, т. е. на то расстояние, на котором расположена над осью абсцисс прямая, изображающая R (фиг. 21,*Б*). При этом там, где R меньше $\frac{MS}{C}$, их разность отрицательна, и, наоборот, где R больше $\frac{MS}{C}$ их разность положительна.

Воспользуемся теперь полученным графиком зависимости r от напряжения на сетке для рассмотрения поведения лампового генератора при нарастании колебаний.

До тех пор, пока $\frac{MS}{C}$ больше R, т. е. r отрицательно, энергия, поступающая за счет обратной связи, превышает потери энергии в системе, и колебания продолжают нарастать. Однако это превышение относительно тем меньше, чем меньше преобладает $\frac{MS}{C}$ над R, т. е. чем меньше по

абсолютной величине r, и значит при напряжениях, лежащих за пределами прямолинейного участка (на графике фиг. 21, *Б* слева от $-U_1$ и справа от U_1) относительное приращение энергии колебаний будет меньше, чем на прямолинейной части.

Это приведет к тому, что нарастание колебаний замедлится, но все же оно будет продолжаться. Вследствие этого напряжения на сетке выйдут еще дальше за пределы прямолинейной части характеристики и достигнут таких областей, где крутизна характеристики уменьшится настолько, что эквивалентное сопротивление r обратится в нуль (точки U_2 и $-U_2$ на графике фиг. 21, *Б*).

При таких значениях напряжения на сетке поступление энергии из анодной цепи как раз равно потерям в контуре. Однако нарастание колебаний все же должно продолжаться. В самом деле, во всей области напряжений, где $\frac{MS}{C}$ больше R, энергия, поступающая в контур из анодной цепи, превосходит потери в нем, и поэтому энергия колебаний за период возрастает, хотя амплитуды колебаний и достигли такой величины, при которой r обращается в нуль. Поэтому еще медленнее, но колебания все же будут нарастать, и напряжения будут заходить в области, где крутизна характеристики еще меньше, т. е. где $\frac{MS}{C}$ меньше R и r положительно, т. е. в области, лежащие справа от U_2 и слева от $-U_2$.

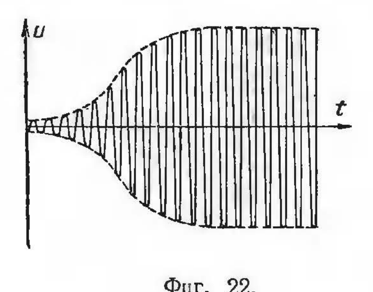
В этих областях энергия, поступающая из анодной цепи, будет уже меньше потерь энергии в контуре, т. е. будет только частично компенсировать эти потери, а остальная часть потерь будет компенсироваться за счет той избыточной энергии, которая была накоплена контуром в той области, где напряжения были меньше и r было отрицательно.

При дальнейшем росте амплитуд колебания будут все дальше и дальше заходить в области, где r положительно, и все большая и большая часть энергии, накопленной контуром в той области, где r отрицательно, будет итти на компенсацию потерь в области, где r положительно.

Очевидно, при каком-то достаточно большом значении амплитуды колебаний (примерно значения U_3 и $-U_3$ на нашем графике) наступит такое положение, что вся избы-

точная энергия, накопленная контуром за ту часть периода, когда r отрицательно, будет итти на компенсацию потерь за ту часть периода, когда r положительно. Тогда дальнейшее нарастание колебаний прекратится и в контуре будут происходить незатухающие колебания со стационарной амплитудой, равной U_3.

Итак, вследствие того, что крутизна характеристики в обе стороны от рабочей точки уменьшается, нарастание колебаний (обусловленное тем, что в рабочей точке обратная связь превышает критическую) постепенно замедляется и в конце концов прекращается вовсе (фиг. 22).



Фиг. 22.

В генераторе устанавливаются незатухающие колебания с такой стационарной амплитудой, при которой энергия, накопленная контуром в области малых напряжений на сетке, как раз компенсирует потери энергии в области больших напряжений на сетке. Для этого, как мы видели, амплитуда колебаний должна быть такова, чтобы переменное напряжение на сетке непременно заходило бы в области, где r положительно. При этом энергия, поступающая из анодной цепи, с избытком компенсирует потери в контуре в той области, где r отрицательно, но недостаточна для компенсации потерь в области, где r положительно. Этот недостаток покрывается за счет той избыточной энергии, которую накапливает контур, в области, где r отрицательно.

Следовательно, установившиеся колебания в ламповом генераторе происходят не потому, что энергия, поступающая из анодной цепи, компенсирует потери энергии в контуре за любой сколь угодно малый промежуток времени, а потому, что она компенсирует эти потери *в среднем за период*. Этим и обусловлено принципиальное отличие лампового генератора от воображаемого контура без потерь, которое, как мы уже указывали, заключается в следующем: в идеальном колебательном контуре без потерь возможны были бы незатухающие колебания с любой амплитудой, которая определяется не свойствами самого контура, а начальными условиями; в ламповом же генераторе возможны незатухающие колебания только с одной стационарной ам-

плитудой, определяемой свойствами самого генератора, а не начальными условиями [1].

В самом деле, если бы обратная связь в точности компенсировала потери в колебательном контуре за каждый сколь угодно малый промежуток времени, то этот контур вел бы себя, как идеальный колебательный контур без потерь, колебания с любой начальной амплитудой в нем бы не затухали и не нарастали и амплитуда незатухающих колебаний целиком определялась бы начальными условиями. При точной компенсации потерь за каждый сколь угодно малый промежуток времени в системе не было бы никакого механизма, который определял бы стационарную амплитуду.

В действительности же в ламповом генераторе дело происходит совсем не так. Компенсация потерь происходит только в среднем за период, в отдельные же части периода энергия контура возрастает, а в другие части периода уменьшается. Поэтому в такой системе возможны незатухающие колебания только с вполне определенной амплитудой, именно такой, при которой возрастание энергии за одну часть периода как раз равно ее убыли за другую часть периода. Только при определенных амплитудах может иметь место такая компенсация потерь в среднем за период, при других амплитудах эта компенсация неизбежно нарушится, и колебания будут либо нарастать, либо затухать.

Если амплитуда колебаний почему-либо станет больше, чем амплитуда возможных незатухающих колебаний, то потери энергии за ту часть периода, когда обратная связь не компенсирует их полностью, возрастут, и колебания будут затухать, пока снова не установится единственно возможная амплитуда незатухающих колебаний. Если же амплитуда колебаний в системе почему-либо упадет, то потери энергии за ту часть периода, когда обратной связи недостаточно для компенсации потерь, наоборот, уменьшатся, и колебания снова начнут нарастать, пока опять-таки не установятся колебания с единственно возможной стационарной амплитудой. Другими словами, случайные отклонения колебаний от единственно возможной стационарной амплитуды всегда будут затухать. Система будет сама под-

[1] Иногда в ламповом генераторе незатухающие колебания могут происходить не с одной, а с несколькими различными стационарными амплитудами. Но величины этих возможных стационарных амплитуд все же определяются свойствами самого генератора, а не начальными условиями.

держивать единственную возможную стационарную амплитуду незатухающих колебаний.

Это обстоятельство играет принципиальную роль. Если бы это было не так, т. е. если бы после случайных отклонений амплитуды колебаний от стационарной колебания не возвращались к прежней амплитуде, то такие незатухающие колебания не могли бы существовать. Действительно, ведь небольшие отклонения от стационарной амплитуды всегда неизбежны в системе (вследствие, например, тех же неизбежных случайных толчков, которые выводят систему из состояния равновесия), и если бы эти случайные отклонения амплитуды не затухали, а нарастали, то колебания с постоянной амплитудой в системе не могли бы существовать.

Совершенно так же, как реальная система может находиться в покое только в состоянии устойчивого равновесия, так и колебания со стационарной амплитудой могут происходить в реальной системе, только если эта стационарная амплитуда устойчива. Для этого необходимо, чтобы небольшие отклонения от амплитуды установившихся незатухающих колебаний как в ту, так и в другую сторону затухали бы, т. е. чтобы система сама выравнивала амплитуду колебаний. Если же свойства системы таковы, что небольшие отклонения от стационарной амплитуды не затухают, а нарастают, то такие колебания оказываются неустойчивыми, и значит в реальной системе существовать не могут.

В рассмотренном нами случае единственная возможная стационарная амплитуда незатухающих колебаний, как мы убедились, устойчива. Это обусловлено тем, что мы выбрали определенный тип характеристики лампы и определенное положение рабочей точки — именно в области, где крутизна ее наибольшая. При другом типе характеристики или другом положении рабочей точки на ней могут встретиться случаи, когда колебания со стационарной амплитудой хотя и возможны в смысле условия компенсации потерь, но оказываются неустойчивыми и, следовательно, в реальной системе существовать не могут.

Все то, что было сказано относительно установления колебаний в ламповом генераторе, может быть пояснено на механической модели генератора — маятнике Жуковского.

Как мы уже видели, маятник Жуковского начнет совершать колебания, если скорость вала выбрана так, что она лежит в падающей части характеристики трения. На том участке этой падающей характеристики, который можно

считать прямолинейным, вал помогает маятнику больше, чем мешает, и, следовательно, проходя через этот участок в сторону движения вала, маятник получает больше энергии, чем он расходует на преодоление силы трения при движении в направлении против вала. Поэтому в результате движения туда и обратно на этом участке энергия маятника, а значит и амплитуда колебаний возрастают, и он во всяком случае заходит на криволинейные участки характеристики трения. Но и в этих криволинейных участках характеристики маятник получает энергию от вала до тех пор, пока он проходит через падающий участок характеристики. Положение меняется, когда скорость маятника возрастает настолько, что он будет заходить в области, где характеристика не падает, а поднимается[1].

В этих областях трение при увеличении относительной скорости возрастает, и вращение вала больше «мешает» маятнику, чем «помогает» ему. В результате при движении по этим поднимающимся участкам характеристики маятник не только не получает энергию от вала, но, наоборот, расходует часть своей энергии на преодоление сил трения. В конце концов наступит такое положение, когда вся энергия, которую получает маятник при движении на падающем участке характеристики, будет расходоваться на движение на поднимающемся ее участке, и, следовательно, дальнейшее нарастание колебаний прекратится. Маятник будет за каждое колебание получать и расходовать одинаковое количество энергии, и его энергия, а значит и амплитуда, в конце каждого колебания будет иметь ту же величину, что и в начале этого колебания, т. е. будут происходить незатухающие колебания с некоторой определенной амплитудой.

Как и в случае лампового генератора сразу видно принципиальное отличие этих незатухающих колебаний от тех незатухающих колебаний, которые совершал бы маятник, если бы в нем вообще отсутствовало трение. В этом случае энергия маятника в течение всего периода колебаний оставалась бы постоянной — она только переходила бы из потенциальной в кинетическую и обратно, но не расходовалась, и поэтому ее не нужно было бы пополнять. В случае же маятника на вращающемся валу в течение периода энер-

[1] Когда мы говорим, что маятник „заходит“ на тот или иной участок характеристики трения, то это нужно понимать так, что речь идет о некоторой области, в которой происходят изменения с к о р о с т и м а я т н и к а, а значит в которой изменяется и относительная скорость вала и втулки.

гия колебаний не остается постоянной: в течение части периода она расходуется, а в течение другой части периода она пополняется за счет постоянного источника (двигателя, вращающего вал). Для того чтобы колебания были незатухающими, конечно, необходимо, чтобы энергия по окончании периода была такой же, как и в начале периода, но в течение периода она изменяется. Это отличие незатухающих колебаний, которые совершает маятник на вращающемся валу, от тех, которые совершал бы маятник без трения, совершенно такое же, как отличие незатухающих колебаний в ламповом генераторе от незатухающих колебаний, которые могли бы происходить в идеальном колебательном контуре без потерь.

Как и в случае лампового генератора, невозможно точно скомпенсировать потери на трение за каждый сколь угодно малый промежуток времени, но можно при помощи соответствующих устройств пополнять потери энергии, которые происходят за каждый период. Компенсация потерь в маятнике Жуковского — это компенсация не в каждый данный момент, а компенсация в среднем за период. Как и в случае лампового генератора, с этим обстоятельством связано то важное свойство незатухающих колебаний, о котором мы уже неоднократно говорили. Колебания маятника будут происходить с вполне определенной стационарной амплитудой, зависящей от свойств самой системы, а не от начальных условий.

При рассматриваемой форме характеристики трения и скорости вала, лежащей на падающем участке, существует только одно такое положение, при котором потери энергии на поднимающемся участке как раз будут равны поступлению энергии на падающем участке, и, следовательно, незатухающие колебания могут происходить только с одной определенной стационарной амплитудой и эта амплитуда будет устойчива. В этом можно убедиться при помощи рассуждений, аналогичных тем, которыми мы пользовались для рассмотрения тех же вопросов в применении к ламповому генератору.

13. УСТАНОВИВШИЕСЯ КОЛЕБАНИЯ

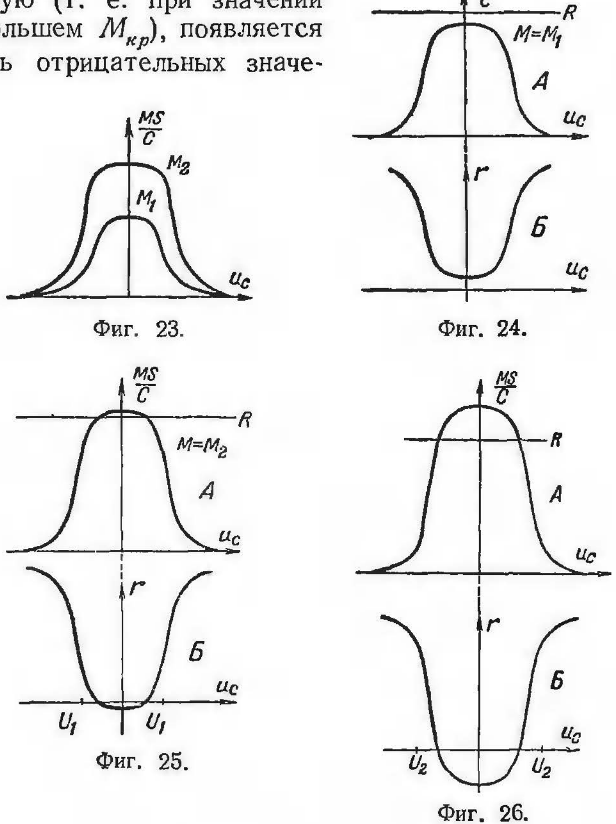
Посмотрим теперь, от чего зависит величина стационарной амплитуды тех незатухающих колебаний, которые устанавливаются в ламповом генераторе. При этом мы попрежнему будем предполагать, что рабочая точка лежит в середине прямолинейной части характеристики и что, следо-

вательно, с ростом напряжения на сетке крутизна характеристики убывает в обе стороны от рабочей точки.

Как было показано в предыдущем параграфе, в генераторе всегда устанавливаются колебания с такой стационарной амплитудой, что напряжения на сетке выходят за пределы области, где r отрицательно. При этом, чем большего значения достигает абсолютная величина r в области, где оно отрицательно, тем больше энергии накапливается в контуре в этой области и тем больше потери могут быть скомпенсированы в области, где r положительно, и, следовательно, тем дальше заходят колебания в эту область. Учитывая это, мы можем сразу дать качественный ответ на вопрос о величине стационарной амплитуды в том или другом конкретном случае. А именно, чем больше оказывается область напряжений на сетке, в которой r отрицательно, и чем больше абсолютные значения r в этой области, тем больше должна быть стационарная амплитуда. Поэтому весь вопрос сводится к выяснению того, как видоизменяется зависимость r от напряжения на сетке при изменении тех или иных параметров лампового генератора. Проследить это можно при помощи тех же графиков, выражающих зависимость r от напряжения на сетке, которыми мы пользовались в предыдущем параграфе.

Значение r зависит от соотношения между $\frac{MS}{C}$ и R и, следовательно, от значений каждого из параметров M, S, C и R в отдельности. Мы начнем с наиболее часто встречающегося на практике случая, когда изменяется величина M, т. е. выясним, как изменяется амплитуда колебаний при изменении величины обратной связи. При увеличении M кривая $\frac{MS}{C}$, очевидно, поднимается кверху, но при этом крылья ее, лежащие на оси абсцисс, остаются на месте. В самом деле, крылья, лежащие на оси абсцисс, соответствуют $S=0$, и, очевидно, при увеличении M $\frac{MS}{C}$ остается равным 0 (при $S=0$) независимо от величины M. Следовательно, при увеличении M средняя часть кривой $\frac{MS}{C}$ поднимается, а склоны ее становятся более крутыми. На фиг. 23 изображены кривые $\frac{MS}{C}$ для двух различных значений M, причем M_2 больше, чем M_1. Учтя сказанное, нетрудно проследить, как изменяется вид кривой, изображаю-

щей r, при изменениях M. Пока кривая $\frac{MS}{C}$ не достигает горизонтальной прямой, изображающей R (фиг. 24,*А*), т. е. пока обратная связь не достигает критической (M_1 имеет значение, меньшее $M_{кр}$), r везде положительно (фиг. 24,*Б*) и незатухающие колебания вообще невозможны. По мере увеличения M кривая $\frac{MS}{C}$ поднимается, и после того как обратная связь превзошла критическую (т. е. при значении M_2, большем $M_{кр}$), появляется область отрицательных значе-



Фиг. 23.

Фиг. 24.

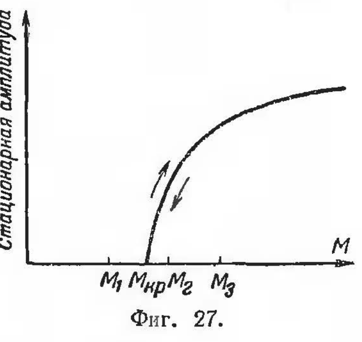
Фиг. 25.

Фиг. 26.

ний r (фиг. 25). В генераторе наступает самовозбуждение колебаний и устанавливаются незатухающие колебания со стационарной амплитудой, примерно равной U_1 (фиг. 25). При дальнейшем увеличении M до значения M_8 (фиг. 26,*А*) область,

где r отрицательно, увеличивается и абсолютные значения r в этой области возрастают, а значит увеличиваются и значения стационарной амплитуды; она достигает величины, примерно равной U_2 (фиг. 26,*Б*). При еще большем увеличении M абсолютные значения r в области, где оно отрицательно, продолжают увеличиваться, но сама эта область почти перестает расширяться. Поэтому стационарная амплитуда хотя и продолжает увеличиваться с ростом M, но не так быстро, как вначале. Весь прослеженный нами ход изменений стационарной амплитуды при увеличении M изображен графически на фиг. 27. На этом графике примерно отмечены те три значения M, равные M_1, M_2 и M_3, для которых были построены графики фиг. 24, 25 и 26.

Для того чтобы проследить ход изменений стационарной амплитуды при изменении обратной связи в обратном направлении, т. е. от бо́льших значений M в сторону их уменьшения, нужно повторить все рассуждения в обратном порядке. Легко видеть, что по мере уменьшения M стационарная амплитуда будет уменьшаться и ее значения, соответствующие какому-либо определенному значению M, будут совпадать, независимо от того, проходит M через это значение в сторону увеличения или в сторону уменьшения. Поэтому кривая фиг. 27 справедлива как для увеличения, так и для уменьшения значения M (на что и указывают две стрелки разных направлений на графике). В частности, как только обратная связь станет меньше критической, колебания в генераторе прекратятся. Иначе говоря, в рассматриваемом случае колебания в генераторе возникают и срываются при одном и том же значении $M = M_{кр}$, т. е. при одном и том же положении катушки обратной связи.

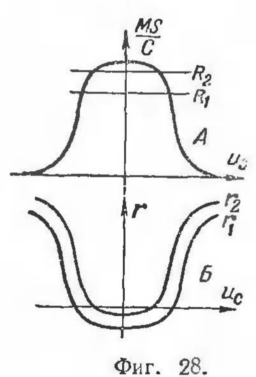


Фиг. 27.

Мы обращаем внимание на это обстоятельство потому, что возможны и на практике нередко встречаются случаи, когда колебания в генераторе возникают и прекращаются (срываются) при различных значениях M. Один из таких случаев будет рассмотрен в следующем параграфе, а пока рассмотрим, как величина стационарной амплитуды зави-

сит от изменения других параметров лампового генератора. Способ этого рассмотрения совершенно аналогичен тому, которым мы пользовались для выяснения зависимости величины стационарной амплитуды от M, и поэтому мы не будем повторять всех рассуждений, а ограничимся лишь краткими указаниями.

Начнем также с часто встречающегося на практике случая, когда изменяется емкость конденсатора колебательного контура, т. е. генератор перестраивается на другую частоту. Очевидно, увеличение C уменьшает величину $\frac{MS}{C}$, т. е. по мере увеличения емкости кривая $\frac{MS}{C}$ опускается, и, значит, стационарная амплитуда уменьшается. При дальнейшем увеличении C может случиться, что $\frac{MS}{C}$ окажется меньше R; r станет положительным и колебания прекратятся. Иными словами, чем больше емкость колебательного контура, тем больше должна быть обратная связь, чтобы колебания не сорвались, т. е. критическое значение обратной связи тем больше, чем ниже частота генератора[1]. Радиолюбители, пользующиеся регенератором с индуктивной обратной связью, несомненно, обращали внимание на это обстоятельство.



Фиг. 28.

Легко проследить также влияние изменений R на величину стационарной амплитуды. Увеличению R от значения R_1 до значения R_2 соответствует подъем горизонтальной прямой, изображающей R (фиг. 28,*А*). Область, где r отрицательно, суживается, и абсолютные значения r уменьшаются (на фиг. 28,*Б* r_1 соответствует $R=R_1$, а r_2 соответствует $R=R_2$). Следовательно, по мере увеличения R стационарная амплитуда уменьшается. При некотором достаточно большом значении R, когда оказывается, что R

---

[1] Следует отметить, что этот вывод не имеет общего характера, а касается только рассматриваемого генератора с индуктивной обратной связью. В генераторах с емкостной обратной связью картина может быть иной, так как одновременно с изменением емкости контура может изменяться и величина обратной связи.

стало больше $\frac{MS}{C}$ (т. е. обратная связь стала меньше критической), колебания срываются.

Что касается влияния величины S на стационарную амплитуду, то следует прежде всего заметить, что значение S в рабочей точке определяет только критическое значение обратной связи (чем больше S, тем меньше $M_{кр}$). Однако стационарная амплитуда зависит не от значения S в рабочей точке, а от хода S во всей области рабочих напряжений на сетке, т. е. от вида характеристики. С помощью рассуждений, аналогичных тем, которыми мы пользовались выше, можно было бы проследить, как зависит стационарная амплитуда от вида характеристики лампы. Не приводя этих рассуждений, мы отметим только одно обстоятельство, которое иногда важно учитывать на практике. Как следует из всего сказанного выше, стационарная амплитуда напряжений на сетке во всяком случае выходит за пределы прямолинейной части характеристики. Поэтому, чем больше эта прямолинейная часть, тем больше, как правило, оказываются стационарные амплитуды при прочих равных условиях.

В заключение рассмотрим установившиеся колебания в генераторе с точки зрения представлений об эквивалентном сопротивлении.

Как мы видели, эквивалентное сопротивление r в случае колебаний со стационарной амплитудой при различных мгновенных напряжениях на сетке лампы имеет разную величину и должно непременно проходить как через отрицательные, так и через положительные значения. Иначе говоря, мгновенное значение эквивалентного сопротивления при установившихся колебаниях есть всегда величина переменная — и притом знакопеременная. Поэтому режим установившихся колебаний в генераторе нельзя охарактеризовать каким-либо определенным постоянным значением эквивалентного сопротивления.

Можно, однако, как уже указывалось (§ 7), рассматривать не мгновенные, а средние значения эквивалентного сопротивления за один период колебаний. При этом нужно учитывать, что увеличение или уменьшение энергии контура за какой-либо очень малый промежуток времени определяется не только тем мгновенным значением, которое имеет эквивалентное сопротивление в течение этого промежутка времени, но и мгновенным значением тока, соответствующим этому промежутку времени.

В самом деле, изменение энергии контура за очень малый промежуток времени определяется, как мы видели, следующим выражением:

$$\Delta W = -ri^2\Delta t,$$

где r — мгновенное эквивалентное сопротивление, а i—мгновенное значение тока, соответствующие малому промежутку времени Δt. Поэтому для определения среднего значения эквивалентного сопротивления за период нужно вычислять не среднее значение r за период, а среднее значение величины ri^2 за период, и из него определить среднее значение r. Зная, по какому закону изменяется величина тока в контуре (например, если этот закон близок к синусоидальному), можно вычислить среднее значение эквивалентного сопротивления.

Мы не будем здесь производить этих вычислений и ограничимся только качественными соображениями. Если в среднем за период энергия в контуре не изменяется, то среднее значение величины ri^2 за период (выражающее изменение энергии контура за период) должно быть равно нулю. Вследствие этого и среднее значение эквивалентного сопротивления r оказывается равным нулю. Следовательно, для того чтобы энергия контура не изменялась, т. е. чтобы в контуре происходили незатухающие колебания, среднее эквивалентное сопротивление контура должно быть равно нулю.

Среднее эквивалентное сопротивление, вообще говоря, зависит от амплитуды колебаний. Если амплитуды колебаний таковы, что среднее эквивалентное сопротивление оказывается отрицательным, то колебания в генераторе нарастают. Если же среднее эквивалентное сопротивление оказывается положительным, то колебания затухают. Вследствие этого в генераторе устанавливается именно такая амплитуда колебаний, для которой среднее эквивалентное сопротивление как раз равно нулю. Это возможно потому, что в течение одной части периода эквивалентное сопротивление отрицательно, а в течение другой положительно.

Вернемся теперь к вопросу, который мы затрагивали уже в § 7, но не рассмотрели до конца. Мы указывали там, что точная компенсация потерь за любой сколь угодно малый промежуток времени (мы назвали это там вторым предельным случаем компенсации потерь) не соответствует истинной картине в ламповом генераторе, но все же иногда оказывается ближе к ней, чем картина, рассмотренная в § 5

(которую мы назвали первым предельным случаем компенсации потерь). Теперь мы можем указать, когда именно этот второй предельный случай оказывается близким к истинной картине.

Если обратная связь выбрана столь слабой, что стационарная амплитуда совсем мало выходит за пределы прямолинейного участка характеристики, то, очевидно, в области прямолинейного участка характеристики эквивалентное сопротивление хотя и отрицательно, но по абсолютной величине мало (иначе колебания выходили бы далеко за пределы прямолинейного участка характеристик). А так как в среднем за период оно должно быть равно нулю (колебания установились), то в области, где эквивалентное сопротивление положительно, оно также должно быть мало.

Следовательно, при колебаниях эквивалентное сопротивление хотя и изменяется, но в очень небольших пределах, все время оставаясь близким к нулю. Но это и значит, что происходит почти точная компенсация потерь за каждый малый промежуток времени (в случае точной компенсации потерь эквивалентное сопротивление все время было бы точно равно нулю). Следовательно, генератор при малых амплитудах, лишь слегка выходящих за пределы прямолинейной части характеристики, должен вести себя почти так, как контур, в котором потери точно скомпенсированы, т. е. как идеальный контур без потерь.

Мы сможем на этом основании высказать ряд соображений относительно периода и формы колебаний генератора в этом случае. Это будет сделано позднее, а сейчас подчеркнем еще раз, что генератор ведет себя только *почти так*, как идеальный контур, так как в одном отношении он все же принципиально отличается от идеального контура — незатухающие колебания в нем происходят с вполне определенной амплитудой, в то время как в идеальном контуре они могли бы происходить с любой амплитудой. И обусловлено это различие именно тем, что в генераторе и при малых амплитудах происходит все же компенсация потерь лишь *в среднем за период*, а не за каждый сколь угодно малый промежуток времени в отдельности.

14. МЯГКИЙ И ЖЕСТКИЙ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАТОРА

Как уже было упомянуто в предыдущем параграфе, на практике встречаются два существенно различных типа зависимости величины стационарной амплитуды от изменений обратной связи.

В случае, который рассматривался до сих пор, при увеличении обратной связи колебания в генераторе возникают при определенной величине обратной связи и при уменьшении обратной связи прекращаются (срываются) при том же значении взаимоиндукции обратной связи $M_{кр}$, при котором они возникли.

В другом случае в отличие от первого при уменьшении обратной связи колебания срываются не при том же значении взаимоиндукции обратной связи $M_{кр1}$, при котором они возникли, а при некотором меньшем значении $M_{кр2}$. Иначе говоря, есть такая область значений взаимоиндукции обратной связи, заключенная между $M_{кр2}$ и $M_{кр1}$ в которой колебания не возникают, но если они уже существовали при обратной связи, большей $M_{кр1}$, то они могут продолжать существовать и при обратной связи, меньшей $M_{кр1}$, но большей $M_{кр2}$.

Второй случай отличается от первого также и тем, что при возникновении колебаний сразу устанавливаются колебания с большой амплитудой, в то время как в первом случае при увеличении обратной связи возникают колебания с малой амплитудой, которая затем плавно увеличивается по мере увеличения обратной связи. В силу этого различия первый случай называется мягким, а второй — жестким режимом возникновения колебаний в ламповом генераторе. Тот или другой из этих случаев можно осуществить в одном и том же ламповом генераторе, изменяя лишь режим работы лампы, в частности — положение рабочей точки на характеристике лампы.

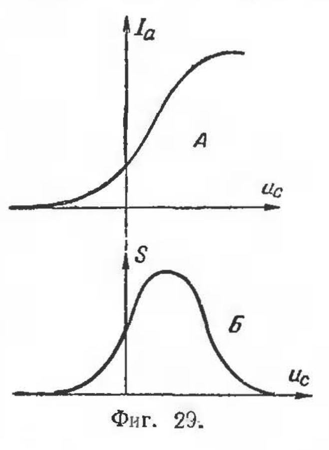
Конечно, самый переход от одного случая к другому не происходит внезапно при определенном положении рабочей точки. Черты того или другого режима возбуждения появляются при перемещении рабочей точки постепенно, но в общем можно сказать, что когда рабочая точка лежит в средней части характеристики, наблюдается мягкий режим возбуждения колебаний. В случае же, когда рабочая точка сильно смещена, например лежит у нижнего сгиба характеристики, имеет место жесткий режим возникновения колебаний.

Мы рассмотрим, почему возможны два таких различных режима возникновения колебаний и как связано существование этих режимов с положением рабочей точки на характеристике.

Поскольку существование того или другого из этих двух режимов связано с положением рабочей точки на характе-

ристике, необходимо выяснить вопрос о том, какую роль играет изменение положения рабочей точки.

В наших прежних рассуждениях мы предполагали, что крутизна характеристики наибольшая в рабочей точке и убывает по обе стороны от нее. Но это, конечно, справедливо только в том случае, если рабочая точка лежит в средней части характеристики. Если же рабочая точка лежит на одном из сгибов характеристики, например на нижнем (фиг. 29,*А*), то крутизна характеристики в рабочей точке невелика, а вправо от рабочей точки возрастает (фиг. 29,*Б*).



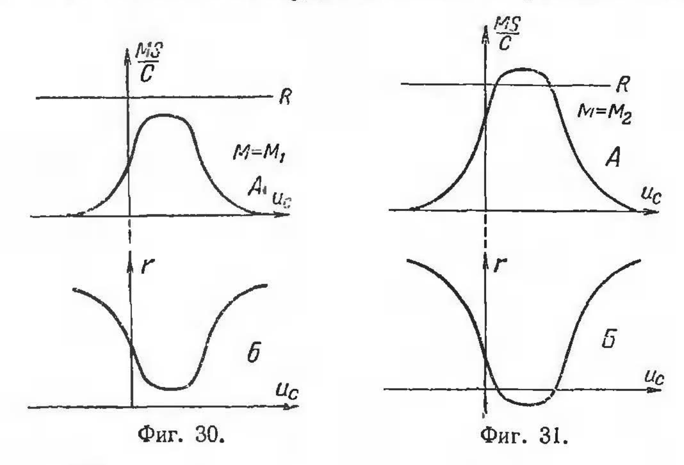
Фиг. 29.

Это различие в ходе крутизны характеристики и определяет, как мы сейчас убедимся, различие в режиме возникновения колебаний. Чтобы убедиться в этом, сравним, как ведет себя эквивалентное сопротивление контура, т. е. величина $r = R - \frac{MS}{C}$ в обоих случаях. Для этого воспользуемся теми же графическими построениями, которыми мы уже пользовались.

На фиг. 24, 25, 26 были приведены графики, соответствующие случаю, когда рабочая точка расположена в средней части характеристики, и поэтому крутизна в рабочей точке наибольшая, а на фиг. 30 приведен график для случая, когда рабочая точка лежит у нижнего сгиба характеристики и поэтому крутизна характеристики в рабочей точке мала, а справа от рабочей точки возрастает. На нем изображены горизонтальная прямая R, кривая $\frac{MS}{C}$ (фиг. 30,*А*) и их разность r (фиг. 30,*Б*) для случая, когда M мало и кривая $\frac{MS}{C}$ нигде не достигает значения R и поэтому r везде положительно.

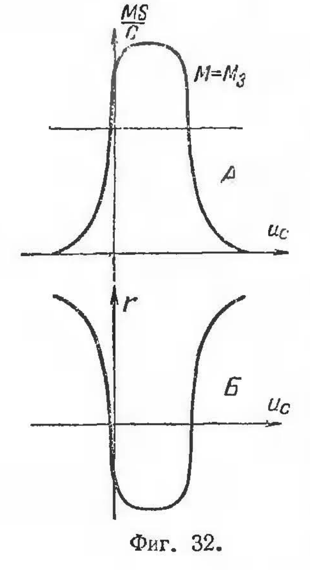
Для того чтобы проследить за поведением генератора при изменении обратной связи, нужно соответственно изменять кривую, изображающую величину $\frac{MS}{C}$, поднимая ее среднюю часть (при увеличении M). При каком-то достаточно

большом $M = M_2$ кривая $\frac{MS}{C}$ будет пересекать прямую R (фиг. 31,A) и появится область, где r отрицательно (фиг. 31,$Б$). Однако эта область не будет охватывать рабочей точки и



Фиг. 30.

Фиг. 31.



Фиг. 32.

в самой рабочей точке r все еще будет положительным. При дальнейшем увеличении M кривая $\frac{MS}{C}$ будет продолжать подниматься и при некотором достаточно большом значении $M = M_3$ она будет пересекать прямую R уже слева от рабочей точки (фиг. 32,A). Область отрицательных значений r расширится и захватит рабочую точку — эквивалентное сопротивление в рабочей точке станет отрицательным (фиг. 32,$Б$).

Сопоставляя фиг. 30, 31, 32 с фиг. 24, 25, 26, мы обнаружим существенное различие в поведении величины r в обоих рассматриваемых случаях. В первом случае (фиг. 24, 25, 26) при увеличении M эквивалентное сопротивление становится отрицательным прежде всего в рабочей точке. Состояние равновесия становится неустойчивым и возникают колебания; но стационарная

амплитуда сначала будет небольшой, так как область отрицательных сопротивлений вначале мала.

По мере увеличения M область отрицательных значений будет возрастать. При уменьшении M весь процесс будет протекать в обратном направлении — амплитуда колебаний будет уменьшаться постепенно, пока не упадет до нуля.

Во втором случае (фиг. 30, 31, 32) картина оказывается существенно иной. При увеличении M эквивалентное сопротивление становится отрицательным сначала не в рабочей точке, а в стороне от нее (фиг. 31). Пока в рабочей точке сопротивление не стало отрицательным, колебания сами по себе не возникают, т. е. самовозбуждение колебаний отсутствует. Но если бы в генераторе по какой-либо внешней причине возникли колебания достаточно большой амплитуды, такой, что они далеко заходили бы в область отрицательных значений r, то энергия таких колебаний в этой области значительно возрастала бы, и потери энергии в области положительных значений r могли быть скомпенсированы, а значит могли бы существовать незатухающие колебания. Если же амплитуда колебаний, возникших по какой-либо внешней причине, так мала, что они не заходят в область отрицательных значений r, то в контуре происходят только потери энергии и значит эти малые колебания затухнут.

Отсюда сразу видно, что существует такая область значений M, в которой самовозбуждение колебаний не происходит, но незатухающие колебания могут существовать, если в контуре по какой-либо причине возникли колебания, которые имеют достаточно большую амплитуду.

Посмотрим теперь, как будет вести себя генератор при дальнейшем увеличении M. Когда M увеличится, например, до значения M_3, кривая $\frac{MS}{C}$ поднимется настолько, что эквивалентное сопротивление в рабочей точке окажется отрицательным (фиг. 32,*Б*), состояние равновесия станет неустойчивым и в системе возникнут колебания. Но так как область, где значение r отрицательно, при этом уже велика и абсолютные значения r в этой области также велики, то возникшие колебания возрастут до большой амплитуды, т. е. стационарная амплитуда будет велика. При дальнейшем увеличении M область, где r отрицательно, возрастает медленно, но зато продолжают расти абсолютные значе-

ния r, и, следовательно, амплитуда установившихся колебаний тоже возрастает.

Проследим теперь, что будет происходить при изменении M в обратном направлении, т. е. при уменьшении M, например, от значения M_3.

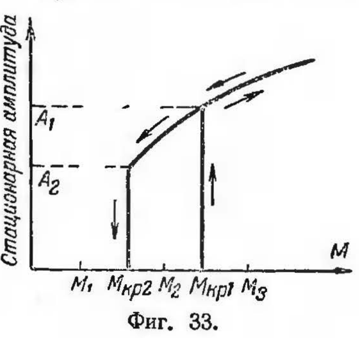
Поскольку при значении $M=M_3$ в генераторе существовали незатухающие колебания с большой амплитудой, то они, как указывалось выше, будут продолжать существовать и при значениях M, меньших M_3. Однако область, где r отрицательно, будет постепенно суживаться, и абсолютные значения r будут уменьшаться; вместе с тем будет уменьшаться и стационарная амплитуда. При этом колебания все меньше и меньше будут заходить в область, где r отрицательно. Когда M уменьшится до некоторой величины, меньшей M_2, амплитуда колебаний упадет настолько, что прибыли энергии в небольшом участке области отрицательных значений r, в который колебания заходят, будет уже недостаточно для того, чтобы скомпенсировать потери во всей остальной области положительных значений r, и, следовательно, незатухающие колебания дальше не смогут существовать, — произойдет срыв колебания.

Таким образом, во втором рассмотренном случае существует не одно, а два различных критических значения M, одно $M_{кр1}$, при котором наступает самовозбуждение колебаний, и другое $M_{кр2}$ (меньшее, чем $M_{кр1}$), при котором уже существующие в генераторе незатухающие колебания срываются.

Наличие этих двух критических значений обратной связи и является наиболее характерной чертой жесткого режима. Эта особенность жесткого режима хорошо знакома всем радиолюбителям, пользующимся приемниками с обратной связью, и практически сказывается следующим образом. Если увеличить обратную связь настолько, чтобы в регенераторе возникли колебания, то, чтобы сорвать возникшие колебания, часто оказывается необходимым ослабить обратную связь до величины, заметно меньшей, чем та, при которой колебания возникли. Это явление обычно называют затягиванием обратной связи.

Прослеженную зависимость стационарной амплитуды от величины взаимоиндукции обратной связи M в случае жесткого режима можно изобразить графически так же, как это было сделано в предыдущем параграфе для мягкого режима.

В случае жесткого режима (фиг. 33) колебания возникают при некоторой достаточно большой обратной связи $M_{кр1}$. При этом сразу устанавливаются колебания с большой амплитудой A_1. Далее, по мере увеличения M амплитуда колебаний постепенно увеличивается. На обратном пути при уменьшении M колебания не сорвутся при значении $M_{кр1}$, а будут существовать и при значениях M, меньших $M_{кр1}$, но больших $M_{кр2}$. При этом амплитуда их будет плавно уменьшаться. При значении $M = M_{кр2}$ колебания сорвутся, т. е. амплитуда колебаний резко упадет от некоторой конечной величины A_2 до нуля. Поэтому при жестком режиме в генераторе нельзя получить колебания с малой амплитудой, а лишь с амплитудой, превышающей A_2.



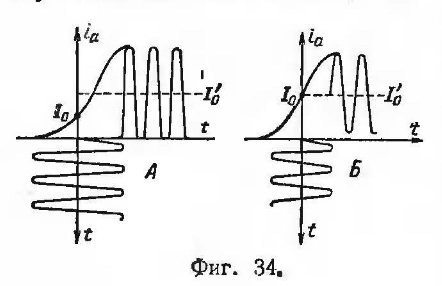
Фиг. 33.

Все эти изменения стационарной амплитуды при изменении величины M изображены на графике фиг. 33. Стрелки на графике указывают направление, в котором изменяется M, и, следовательно, показывают, к какому случаю (увеличению или уменьшению M) относится данный участок кривой (тот участок кривой, где стоят стрелки двух направлений, относится к обоим случаям — этот участок кривой одинаков как для увеличения, так и для уменьшения M). Для того чтобы связать этот график с теми, на которых были прослежены изменения стационарной амплитуды, на фиг. 33 примерно отмечены значения M_1, M_2 и M_3, соответствующие трем случаям, изображенным на фиг. 30, 31 и 32.

Как уже указывалось, в случае M большего, чем $M_{кр1}$, колебания возникают сами по себе, т. е. имеет место самовозбуждение колебаний. При M меньшем, чем $M_{кр1}$, но большем, чем $M_{кр2}$, колебания сами не возникают (нет самовозбуждения), но могут существовать, если они уже возбуждены каким-либо способом. Поэтому, если сначала M было больше $M_{кр1}$ и в генераторе существовали незатухающие колебания, то при уменьшении обратной связи до значения M, меньшего $M_{кр1}$, но большего $M_{кр2}$, незатухающие колебания (с несколько уменьшенной амплитудой) продолжают существовать.

Но возможен и другой путь возникновения колебаний при обратной связи, большей $M_{кр2}$ и меньшей $M_{кр1}$. Незатухающие колебания в этой области могут возникнуть в результате какого-либо резкого толчка, например включения анодного напряжения. Это и понятно. Всякий резкий толчок вызывает появление колебаний в контуре генератора, и если амплитуда этих возникших от толчка колебаний настолько велика, что они заходят достаточно далеко в область отрицательных значений r, то возникшие колебания не затухают, а нарастают и превращаются в незатухающие.

Ясно, что чем ближе к рабочей точке лежит область отрицательных значений r, тем меньший толчок нужен для возбуждения незатухающих колебаний. Следовательно, чем ближе M к $M_{кр1}$, тем легче возникают незатухающие колебания в генераторе под действием случайных толчков.



Фиг. 34.

С этим обстоятельством также всегда приходится сталкиваться радиолюбителям, применяющим приемники с обратной связью. При неправильно выбранной рабочей точке на характеристике лампы (что, как указывалось, и приводит к жесткому режиму) прием вблизи порога генерации часто оказывается невозможным именно потому, что в результате всяких случайных воздействий в регенераторе очень легко возникают незатухающие колебания, и чтобы эти колебания сорвать, приходится уходить довольно далеко от порога генерации. Поэтому жесткий режим в регенераторе является нежелательным и его следует избегать.

Наличие жесткого режима в регенераторе может быть обнаружено по следующему признаку. При жестком режиме в момент возникновения колебаний резко изменяется среднее значение анодного тока в лампе, о чем можно судить по скачку стрелки анодного миллиамперметра или по щелчку в телефоне, включенном в анодную цепь.

Причину этого резкого изменения среднего значения анодного тока поясняет фиг. 34. Если рабочая точка находится, например, на нижнем сгибе характеристики, то при подаче синусоидального напряжения на сетку лампы анодный ток возрастает при положительном напряжении на сет-

ке гораздо больше, чем убывает при отрицательном, и поэтому среднее значение анодного тока I_0' увеличивается по сравнению со значением I_0 в отсутствии колебаний (фиг. 34,*А*). В случае же, когда рабочая точка находится в средней части характеристики, изменения анодного тока в обе стороны от нулевого значения (происходящие при подаче синусоидального напряжения) оказываются одинаковыми, и среднее значение анодного тока I_0' остается таким же, как и значение I_0 в отсутствии колебаний (фиг. 34,*Б*).

15. ФОРМА И ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ

Рассматривая ламповый генератор при больших стационарных амплитудах (§ 5 и 6), мы уже касались вопроса о форме и периоде этих колебаний. Было показано, что существенную роль при этом играет добротность колебательного контура генератора. Если добротность контура велика, то форма колебаний достаточно близка к синусоидальной, а период их близок к собственному периоду колебательного контура. Однако при этом рассмотрении, предполагая заранее, что амплитуда колебаний велика, мы не могли выяснить всех обстоятельств, влияющих на форму и период колебаний, создаваемых генератором, в частности ничего не могли ответить на вопросы о том, как сказывается на форме и периоде колебаний изменение их амплитуды.

Сейчас, после того как выяснена вся картина при различных величинах стационарной амплитуды, мы можем ответить на указанные вопросы. Начнем с вопроса о форме колебаний.

Прежде всего можно утверждать, что колебания в воображаемом колебательном контуре без потерь должны иметь синусоидальную форму. Хотя и нельзя осуществить на практике колебательного контура без потерь, указанное утверждение можно высказать на основании чисто теоретических соображений. Но и не приводя этих соображений, можно обосновать указанное утверждение следующим образом.

Опыт показывает, что в контуре с малыми потерями колебания по форме очень близки к синусоидальным. Они отличаются от синусоидальных только тем, что амплитуды их не остаются постоянными, а медленно убывают. Но так как затухание мало и убывание амплитуд происходит очень медленно, то в пределах одного периода колебаний форма их практически не отличается от синусоидальной. Ясно, что

если бы затухание в контуре было полностью устранено, то колебания в нем имели бы точно синусоидальную форму.

В колебательном же контуре лампового генератора, как было показано, затухание скомпенсировано не в каждый момент времени, а только в среднем за период, и в отдельные части периода колебания происходят не так, как в контуре без затухания. В то время как в контуре без затухания энергия колебаний в течение периода остается неизменной, в ламповом генераторе энергия в течение части периода может уменьшаться, а в течение другой части периода возрастать (но так, что по окончании периода она будет такая же, как в начале периода).

Как уже указывалось (§ 5), каждый период незатухающих колебаний генератора изображается не одной синусоидой, а как бы составлен из отдельных кусков затухающих и нарастающих «синусоид». И хотя при большой добротности контура эти куски затухающих и нарастающих «синусоид» очень мало отличаются друг от друга, но принципиально в ламповом генераторе это всегда куски затухающих и нарастающих «синусоид». Между тем куски затухающих и нарастающих «синусоид» — это уже не есть настоящая синусоида, ибо синусоида — это кривая вполне определенной формы. Отсюда видно, что колебания в ламповом генераторе принципиально не могут иметь точно синусоидальной формы. Но отсюда же легко заключить, при каких условиях эти колебания будут по форме близки к синусоидальным.

Как уже указывалось, слабо затухающая «синусоида» по форме очень близка к точной синусоиде. Точно так же слабо нарастающая «синусоида» по форме тоже близка к точной синусоиде. Поэтому, если колебания будут состоять из кусков очень слабо затухающих и очень слабо нарастающих «синусоид» то по форме они будут очень близки к синусоидальным. Но для того чтобы колебания были такими слабо нарастающими в области, где эквивалентное сопротивление r отрицательно, и такими слабо затухающими в области, где r положительно, нужно, чтобы и в той, и в другой области r было очень мало по абсолютной величине, а это, как было показано в § 13, имеет место в том случае, когда колебания лишь совсем немного выходят за пределы прямолинейной части характеристики, т. е. пока стационарная амплитуда достаточно мала.

По мере увеличения стационарной амплитуды (например, вследствие увеличения обратной связи), когда колеба-

ния все больше и больше выходят за пределы прямолинейной части характеристики, r изменяется все в более и более широких пределах, достигая все больших как отрицательных, так и положительных значений. Поэтому становятся все более и более нарастающими куски «синусоид» в области, где r отрицательно, и все более и более затухающими куски «синусоид» в области, где r положительно.

Из всего сказанного ясно, что колебания, создаваемые ламповым генератором, будут по форме весьма близки к синусоидальным, пока амплитуда их мала и форма их будет все более и более заметно отклоняться от синусоидальной по мере увеличения стационарной амплитуды.

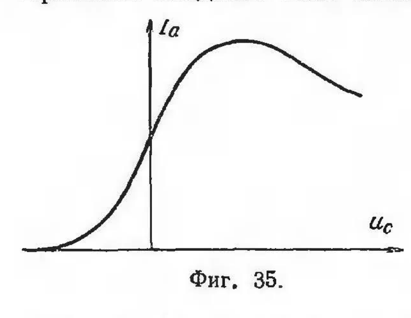
Но все же, если добротность колебательного контура генератора достаточно велика, то и при больших амплитудах колебаний форма их не будет значительно уклоняться от синусоидальной. Это видно из того, что даже в предельном случае очень больших амплитуд, как было показано в § 6, колебания в контуре не могут существенно отличаться по форме от синусоидальных, если добротность контура велика. Только в случае плохого колебательного контура (с низкой добротностью) колебания генератора при больших амплитудах могут иметь резко несинусоидальную форму.

В самом деле, поскольку при больших амплитудах колебаний импульсы анодного тока имеют столообразную форму, а э. д. с. обратной связи имеет вид отдельных коротких импульсов, колебательный контур, не обладающий большой добротностью, плохо выделяет из этих импульсов первую гармонику, и, следовательно, в колебательном контуре будут достаточно сильны не только первая, но и более высокие гармоники, и форма колебаний будет существенно отлична от синусоидальной.

Таким образом, форма колебаний, создаваемых ламповым генератором, существенно зависит от добротности колебательного контура этого генератора. Необходимо, однако, учитывать, что добротность колебательного контура хотя и определяется параметрами самого контура (его емкостью, индуктивностью и активным сопротивлением), но иногда может заметно снижаться вследствие воздействия на контур электронной лампы. Прежде всего, например. для той схемы с колебательным контуром в цепи сетки, которую мы все время рассматриваем, наличие сеточных токов может снижать добротность контура, так как сопротивление участка сетка — катод включено параллельно кон-

туру и нагружает его, вследствие чего добротность контура уменьшается. Поэтому даже если добротность колебательного контура сама по себе достаточно высока, наличие больших сеточных токов может привести к тому, что колебания, создаваемые генератором, будут по форме существенно отличны от синусоидальных.

Помимо сеточных токов, некоторые особенности характеристики анодного тока также могут привести к тому, что влияние лампы как бы будет уменьшать добротность контура. Мы предполагали все время, что крутизна характеристики при больших напряжениях обоих знаков на сетке уменьшается до нуля и далее, при еще больших напряжениях все время остается равной нулю. Для больших отрицательных напряжений (когда лампа заперта) это предположение всегда правильно, но для больших положительных напряжений это предположение может не соблюдаться.



Фиг. 35.

При больших положительных напряжениях на сетке анодный ток некоторых типов ламп начинает уменьшаться[1] и, следовательно, после верхнего загиба на характеристике лампы появляется спадающая ветвь (фиг. 35). Наличие этой спадающей ветви приводит к тому, что при больших амплитудах колебаний добротность контура как бы начинает уменьшаться.

В самом деле, в случае, когда крутизна характеристики при больших напряжениях на сетке падает до нуля и далее остается равной нулю, эквивалентное сопротивление $r = R - \frac{MS}{C}$ при больших напряжениях оказывается равным активному сопротивлению R (так как $S = 0$). Если же существует падающий участок характеристики, то на этом участке крутизна ее отрицательна, и эквивалентное сопро-

[1] Причины этого могут быть различны, например, резкое возрастание сеточного тока или (чаще всего) так называемый динатронный эффект. Происхождение динатронного эффекта будет выяснено позднее при рассмотрении динатронного генератора (§ 21), где этот эффект играет принципиальную роль. Здесь же этот эффект представляет собой побочное явление и поэтому мы не будем останавливаться на его происхождении.

тивление r контура в этой области оказывается больше R, так как из него вычитается величина $\frac{MS}{C}$, имеющая отрицательное значение.

Это увеличение положительного эквивалентного сопротивления в области больших положительных напряжений на сетке (которое может быть очень значительно, если характеристика спадает круто) как бы уменьшает добротность колебательного контура, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Поэтому, если даже колебательный контур сам по себе обладает высокой добротностью, но анодная характеристика лампы имеет падающий участок, то колебания в генераторе при больших амплитудах могут иметь резко несинусоидальную форму.

Все же для ламповых генераторов с колебательным контуром, имеющим достаточно большую добротность (за исключением некоторых специальных случаев, форма колебаний не отличается значительно от синусоидальной, и поэтому такие генераторы применяются обычно только в тех случаях, когда требуется получить синусоидальные колебания. Для получения же колебаний, по форме далеких от синусоидальных, применяются специальные генераторы, описанные в следующей главе.

В заключение выскажем некоторые соображения о периоде колебаний, создаваемых ламповым генератором. Как уже указывалось в § 5, вопрос о периоде колебаний генератора тесно связан с вопросом об их форме. Действительно, период колебаний, создаваемых генератором, определяется прежде всего собственным периодом колебательного контура. Если бы в колебательном контуре было в точности скомпенсировано затухание, то в нем происходили бы незатухающие колебания с частотой, которая точно совпадает с собственной частотой колебательного контура. Все отклонения частоты колебаний генератора от собственной частоты контура могут происходить только потому, что колебания в генераторе фактически происходят не совсем так, как в контуре без потерь, а состоят из кусков нарастающих и затухающих «синусоид». Чем ближе колебания в генераторе к колебаниям в контуре без потерь, т. е. чем ближе они по форме к синусоидальным, тем ближе они по частоте к собственной частоте колебательного контура. Наоборот, чем больше колебания генератора по форме отходят от синусоидальных, тем больше может отличаться частота этих колебаний от собственной частоты контура. При этом часто-

та колебаний генератора может зависеть уже не только от настройки колебательного контура, но и от величины стационарной амплитуды и режима лампы.

Одно из важных требований, предъявляемых почти ко всякому ламповому генератору, это постоянство частоты его колебаний. Аналогично тому, что было сказано об условиях, обеспечивающих постоянство хода часов (§ 4), для того чтобы обеспечить постоянство частоты лампового генератора, необходимо обеспечить, с одной стороны, постоянство собственной частоты колебательного контура, а с другой, — такой режим работы генератора, при котором частота создаваемых им колебаний была бы всегда близка к собственной частоте контура.

Для обеспечения постоянства собственной частоты контура генератора применяются различные методы, однако мы не будем этих методов здесь описывать, поскольку весь вопрос о постоянстве собственной частоты колебательного контура не входит в круг рассматриваемых нами вопросов. Мы будем считать, что тем или иным методом постоянство собственной частоты контура достигнуто, а тогда постоянство частоты колебаний генератора будет обеспечено, если будут выбраны условия, при которых частота колебаний генератора очень близка к собственной частоте контура.

Из всего сказанного выше ясно, каковы эти условия. Во-первых, колебательный контур генератора должен иметь высокую добротность, а, во-вторых, стационарная амплитуда колебаний должна быть достаточно малой, так чтобы напряжения на сетке лишь совсем немного выходили за пределы прямолинейной части характеристики. Тогда, колебания, создаваемые генератором, будут по форме очень близки к синусоидальным, а частота их очень близка к собственной частоте колебательного контура.

Правда, получить колебания, близкие к синусоидальным, можно и при контуре с малой добротностью, если так подобрать обратную связь, чтобы амплитуды колебаний лишь совсем немного выходили за пределы прямолинейной части характеристики.

В самом деле, независимо от величины R мы всегда можем так подобрать $\frac{MS}{C}$, чтобы в пределах прямолинейной части характеристики $\frac{MS}{C}$ лишь совсем немного превышало R. Тогда в этой области эквивалентное сопротивление r будет очень мало, и значит колебания будут очень немного выхо-

дить за пределы этой области, т. е. колебания будут близки к синусоидальным. Иными словами, малость абсолютного значения эквивалентного сопротивления в области прямолинейной части характеристики может быть достигнута как при малых, так и при больших R, важно лишь, чтобы

$$r=\left(R-\frac{MS}{C}\right)$$

было мало.

Очевидно можно получить малое r и при больших R, но тогда и $\frac{MS}{C}$ должно быть велико. Если же R мало, то для получения малых r и $\frac{MS}{C}$ должно быть взято малым.

Однако только при малых R можно практически обеспечить соблюдение условия малости r. Ведь величины, входящие в выражение для r, не бывают абсолютно постоянными. В частности (и это играет роль в первую очередь), крутизна характеристики S зависит от режима лампы, напряжения источников питания и т. д. И чем больше $\frac{MS}{C}$, тем больше будут сказываться эти изменения S на абсолютной величине r. Чтобы пояснить это, рассмотрим конкретные примеры.

Пусть для обеспечения близости колебаний к синусоидальным нужно, чтобы абсолютная величина r (в области, где оно отрицательно) не превышала бы, положим, 0,2 *ом*. С другой стороны, положим, что вследствие изменений режима лампы крутизна ее характеристики изменяется на $\pm 2{,}5\%$, т. е. от своей минимальной величины может увеличиваться на 5%. Посмотрим, как будет изменяться при этом абсолютная величина r в двух случаях:

1) для контура с $R=1$ *ом* (контур с высокой добротностью);

2) для контура с $R=100$ *ом* (контур с низкой добротностью).

Чтобы r по абсолютной величине было мало, выберем в первом случае такое значение M, при котором для наименьшего значения S величина $\frac{MS}{C}=1{,}1$ *ом*. Тогда

$$r=1-1{,}1=-0{,}1 \text{ ом}.$$

При увеличении крутизны на 5% величина $\frac{MS}{C}$ возрастет примерно до 1,16 *ом*, а эквивалентное сопротивление станет равным

$$r = 1 - 1{,}16 = -0{,}16 \text{ ом},$$

т. е. увеличится меньше чем вдвое. Малость r, а вместе с тем и близость колебаний к синусоидальным, несмотря на изменение крутизны характеристик, будут обеспечены, так как r хотя и изменяется, но все же остается меньше 0,2 *ом*.

Чтобы во втором случае (при $R = 100$ *ом*) получить то же значение r, нужно взять такое M, чтобы при наименьшем значении S величина $\frac{MS}{C} = 100{,}1$ *ом*. Тогда

$$r = 100 - 100{,}1 = -0{,}1 \text{ ом}.$$

При увеличении крутизны на 5% величина $\frac{MS}{C}$ возрастет примерно до 105 *ом*, а эквивалентное сопротивление станет равным:

$$r = 100 - 105 = -5 \text{ ом},$$

т. е. увеличится в пятьдесят раз. При столь большом значении r, гораздо большем чем 0,2 *ом*, колебания генератора станут уже несинусоидальными, и поэтому частота этих колебаний будет существенно отличаться от собственной частоты генератора.

Таким образом, хотя при больших R принципиально возможно так подобрать величину обратной связи, чтобы получить колебания, близкие к синусоидальным, практически обеспечить такой режим генератора оказывается невозможным вследствие непостоянства параметров схемы, в первую очередь крутизны характеристики лампы. В случае же малых R, несмотря на небольшие изменения параметров схемы, можно обеспечить синусоидальность колебаний генератора, а вместе с тем и постоянство их частоты.

Вот почему для обеспечения постоянства частоты генератора следует применять колебательные контуры с возможно большей добротностью. В случаях, когда нужно обеспечить очень высокое постоянство частоты генератора, той добротности, которая может быть получена в колебательных контурах, оказывается уже недостаточно. Поэтому в генераторах, от которых требуется очень высокое постоянство частоты, вместо колебательных контуров применяют,

например, так называемые пьезоэлектрические резонаторы (специально вырезанные пластинки кварца, турмалина и т. д.), которые, как и колебательные контуры, обладают определенными собственными частотами колебаний, но отличаются очень высокой добротностью, в десятки и даже сотни раз большей, чем добротность самых лучших электрических колебательных контуров.

Мы рассматривали все время только одну определенную схему лампового генератора, именно схему с колебательным контуром в цепи сетки и индуктивной обратной связью. Применяются, конечно, и другие схемы ламповых генераторов с обратной связью, с колебательным контуром в цепи анода, двумя колебательными контурами (в цепях сетки и анода) и с другими способами введения обратной связи. Однако принципы возбуждения незатухающих колебаний в генераторах с обратной связью остаются одними и теми же, независимо от схемы генератора. Конечно, в различных схемах могут быть несколько различными детали всей картины, например, поступление энергии в колебательный контур может происходить не в те части периода, когда оно происходит в рассмотренной нами схеме. Но основные черты процесса возбуждения незатухающих колебаний остаются прежними, а значит остаются справедливыми и все те основные выводы, к которым мы пришли выше. Поэтому-то для пояснения самого принципа получения незатухающих колебаний с помощью обратной связи мы ограничились рассмотрением только одной простейшей схемы лампового генератора.

ГЛАВА ВТОРАЯ

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

16. ГЕНЕРАТОР С НЕОНОВОЙ ЛАМПОЙ

Наряду с обычным ламповым генератором, создающим колебания, по форме близкие к синусоидальным, широко применяются генераторы, создающие незатухающие колебания резко несинусоидальной формы. Такие резко несинусоидальные, например пилообразные или столообразные по форме колебания принято называть релаксационными, а создающие их генераторы — релаксационными генераторами[1]. Механизм возбуждения релаксационных колебаний во многом отличается от механизма возбуждения синусоидальных колебаний,

---

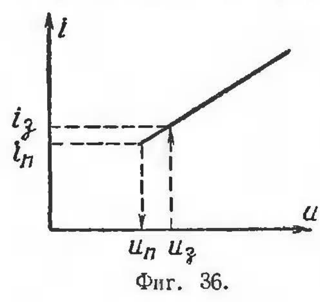
[1] Происхождение термина „релаксационный“ будет разъяснено ниже.

поэтому и принцип действия релаксационных генераторов существенно отличается от принципа действия лампового генератора синусоидальных колебаний.

Принцип действия и основные характерные черты релаксационного генератора мы выясним прежде всего на одном из наиболее простых типов этих генераторов, именно генераторе с неоновой лампой.

Неоновая лампа представляет собой стеклянный сосуд с двумя электродами, заполненный неоном под небольшим давлением.

Поведение неоновой лампы как электрического проводника может быть описано при помощи вольтамперной характеристики лампы, приведенной в упрощенном виде на фиг. 36. Проследим, что происходит с лампой при изменении напряжения на ее электродах. Если напряжение на электродах постепенно повышать, то сначала ток через лампу не будет течь, и лампа не будет светиться. Но после того как напряжение на электродах достигнет некоторой величины $u_з$ (которая называется напряжением зажигания лампы), лампа вспыхивает (начинает светиться красным светом) и в ней возникает сразу заметный ток $i_з$ (ток зажигания). При дальнейшем увеличении напряжения на электродах ток в лампе постепенно увеличивается. Если же напряжение на электродах начать уменьшать, то при напряжении $u_з$ лампа не гаснет, и ток через нее не прекращается, а постепенно уменьшается, пока напряжение не упадет до некоторой величины $u_п$ (которое называется напряжением погасания лампы). В этот момент лампа сразу гаснет и ток через нее скачком падает от значения $i_п$ (ток погасания) до нуля.



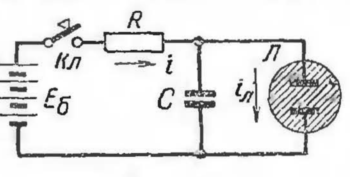
Фиг. 36.

Из рассмотрения вольтамперной характеристики неоновой лампы видно, что эта лампа представляет собой проводник с сопротивлением, величина которого не остается постоянной. Можно считать, что пока лампа горит, она обладает некоторым более или менее постоянным внутренним сопротивлением R_i; когда же она не горит, то ее внутреннее сопротивление равно бесконечности.

Рассмотрим теперь, как будет вести себя неоновая лампа, если ее включить в схему, изображенную на фиг. 37, т. е.

через сопротивление R присоединить к лампе $Л$ источник постоянного напряжения, создающий э. д. с. $E_б$, и зашунтировать лампу конденсатором емкостью C.

В момент, когда мы замкнем ключ $Кл$, конденсатор C еще не заряжен, и напряжение на нем, а также и на электродах лампы равно нулю. Поэтому в момент замыкания ключа лампа не вспыхнет. Но конденсатор будет постепенно заряжаться через сопротивление R, и напряжение на зажимах лампы начнет возрастать; однако пока оно не достигло величины $u_з$, лампа не вспыхивает, и ток через нее не проходит. Но если э. д. с. источника $E_б$ больше, чем напряжение зажигания лампы $u_з$, то наступит момент, когда напряжение на конденсаторе, а значит и на лампе достигнет величины $u_з$. В этот момент лампа вспыхнет и через нее начнет проходить ток. Это эквивалентно тому, как будто параллельно конденсатору присоединено сопротивление R_i, равное внутреннему сопротивлению лампы. И если это сопротивление достаточно мало, то конденсатор должен начать разряжаться через лампу, и напряжение на нем начнет уменьшаться. Разряд конденсатора может прекратиться, и напряжение на лампе может перестать уменьшаться только в том случае, если ток i, проходящий через сопротивление R, равен току $i_л$, проходящему через лампу (если ток $i_л$ больше тока i, то, очевидно, конденсатор будет продолжать разряжаться). Но ток через сопротивление R должен быть равен $i = \frac{E_б - u_л}{R}$, где $u_л$ — напряжение на зажимах лампы.



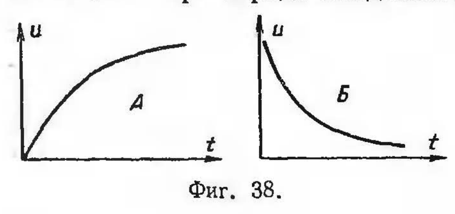
Фиг. 37.

Следовательно, чтобы конденсатор продолжал разряжаться, $\frac{E_б - u_л}{R}$ должно быть меньше $i_л$.

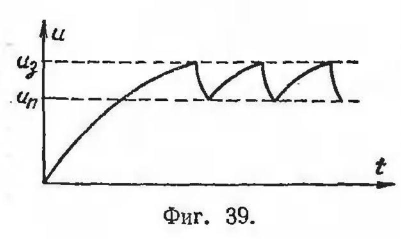
Детальное рассмотрение, которого мы здесь не будем приводить, показывает, что при данной лампе и э. д. с. батареи $E_б$, превышающий $u_з$ лампы, всегда можно подобрать такое большое сопротивление R, при котором напряжение на конденсаторе и на зажимах лампы будет продолжать падать, достигнет значения $u_п$, и лампа погаснет. Внутреннее сопротивление лампы возрастет до бесконечности, и разряд конденсатора через нее прекратится. А так как э. д. с.

батареи $E_б$ больше, чем $u_з$, а значит заведомо больше, чем соответствующее погасанию лампы напряжение на конденсаторе $u_п$, то снова начнется заряд конденсатора. Он будет продолжаться до тех пор, пока конденсатор не зарядится до напряжения $u_з$, и лампа вспыхнет. Дальше будет повторяться уже рассмотренный нами процесс, т. е. в схеме будут происходить периодический заряд конденсатора через сопротивление R и разряд через внутреннее сопротивление лампы R_i, иными словами, в схеме будут происходить электрические колебания.

Легко представить себе, какова должна быть форма этих колебаний. При заряде конденсатора C через сопротивление R напряжение на нем растет по кривой, изображенной на фиг. 38,*А*, причем подъем этой кривой идет тем медленнее, чем больше сопротивление R и емкость C. Разряд же конденсатора через сопротивление R_i идет по кривой, изображенной на фиг. 38,*Б*, причем опять-таки эта кривая опускается тем медленнее, чем больше сопротивление R_i и чем больше емкость конденсатора. Поэтому, если сопротивление R много больше, чем внутреннее сопротивление лампы R_i, то колебания в схеме будут представлять собой последовательные чередования относительно медленных процессов заряда конденсатора от напряжения $u_п$ до напряжения $u_з$ и гораздо более быстрых процессов разряда конденсатора от напряжения $u_з$ до напряжения $u_п$ (фиг. 39). Форма колебаний при этом получается не чисто пилообразной, но вовсяком случае существенно отличается от синусоидальной.



Фиг. 38.



Фиг. 39.

Период колебаний определяется главным образом продолжительностью процесса заряда конденсатора (при условии, что R_i гораздо меньше, чем R, и значит процесс разряда протекает гораздо быстрее, чем процесс заряда), а продолжительность процесса заряда, как уже указывалось, определяется величинами C и R, а именно их произведением CR,

Эта величина имеет размерность времени и называется постоянной времени цепи. Она выражается в секундах, если емкость выражать в фарадах, а сопротивление в омах.

Период колебаний зависит не только от постоянной времени, но и от свойств лампы и э. д. с. батареи, однако при большом R и $E_б$, много большем, чем $u_з$, он близок к постоянной времени цепи, т. е. к величине RC.

Сделаем краткое отступление, чтобы пояснить происхождение термина „релаксационные" колебания (или генераторы).

В механике релаксационными называются такие движения, которые происходят под действием упругих сил в среде, обладающей большой вязкостью. Так как механическим упругим силам в электрических явлениях соответствуют напряжения на конденсаторе, а вязкости соответствует электрическое сопротивление, то по аналогии разряд конденсатора через сопротивление иногда называют электрической релаксацией. А колебания в схеме с неоновой лампой и подобные им представляют собой повторяющиеся процессы заряда и разряда конденсатора, поэтому их называют релаксационными.

Хотя генератор с неоновой лампой является далеко не самым распространенным генератором релаксационных колебаний, но он является достаточно типичным представителем этого класса генераторов для того, чтобы на нем выяснить основные различия релаксационных генераторов и генераторов синусоидальных колебаний.

При рассмотрении ламповых генераторов синусоидальных колебаний мы отметили, что для этих генераторов типично наличие колебательного контура, а остальные элементы генератора служат для поддержания колебаний в этом контуре.

В рассмотренном нами генераторе с неоновой лампой и вообще в релаксационных генераторах такой колебательный контур, как правило, отсутствует, и самый принцип генерации колебаний не имеет ничего общего с методом компенсации затухания. Как мы видели, принцип действия генератора с неоновой лампой сводится к тому, что непериодический сам по себе процесс заряда и разряда конденсатора вследствие наличия специального механизма периодически повторяется. Неоновая лампа является в этом случае тем механизмом, который вызывает периодическое повторение апериодического процесса заряда и разряда конденсатора.

При рассмотрении всех типов релаксационных генераторов в них всегда можно выделить два основных элемента —

цепи, в которых происходят апериодические процессы (заряд и разряд конденсатора, установление и исчезновение тока), и механизм, который обеспечивает периодическое повторение этих апериодических процессов.

В соответствии с этим и период колебаний в случае лампового генератора синусоидальных колебаний и релаксационного генератора определяются совершенно различными обстоятельствами. В генераторе синусоидальных колебаний период определяется главным образом периодом колебательного контура, в случае же релаксационного генератора период определяется главным образом длительностью апериодического процесса, т. е. временной постоянной цепи.

17. ФОРМА КОЛЕБАНИЙ И НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Приведенные выше различия между процессами в генераторах синусоидальных и релаксационных колебаний тесно связаны со следующим различием в их схемах. Поскольку в генераторе синусоидальных колебаний есть колебательный контур, то значит в нем присутствуют два резервуара, в которых может накапливаться энергия. Первый из этих накопителей энергии — емкость, в которой может накапливаться электростатическая энергия зарядов, другой накопитель — индуктивность, в которой может накапливаться магнитная энергия токов. Таким образом, в ламповом генераторе присутствуют два и притом разнородных накопителя энергии — емкость и индуктивность. В релаксационном же генераторе колебательный контур отсутствует, и поэтому в нем, как правило, присутствует только один накопитель энергии, например емкость в схеме с неоновой лампой.

Это различие в числе и типе накопителей энергии является одним из наиболее существенных различий между генераторами синусоидальных и релаксационных колебаний. И с этим различием, как мы сейчас покажем, связано и самое основное, что разделяет эти два типа генераторов — различие в форме создаваемых ими колебаний. Предварительно, однако, сделаем одно замечание. Наличие двух разнородных накопителей энергии — емкости и индуктивности — в генераторах синусоидальных колебаний и одного типа накопителей энергии в генераторах релаксационных колебаний является весьма характерным, но все же не однозначным признаком этих генераторов. Например, существуют генераторы синусоидальных колебаний, в которых присутствуют только емкости и сопротивления — так называемые RC-генераторы. Поэтому все, что будет сейчас ска-

зано о значении числа и типа накопителей энергии, может быть непосредственно применено только к простейшим типам генераторов синусоидальных и релаксационных колебаний. А затем на отдельных примерах мы покажем, как подобные же соображения могут быть применены и к более сложным случаям, которые представляют собой некоторые схемы генераторов в отношении числа и типа накопителей энергии.

Итак рассмотрим, как связаны число и типы накопителей энергии с формой генерируемых колебаний. Вспомним, что в обычном колебательном контуре, если бы в нем не было сопротивления, происходили бы колебания точно синусоидальной формы. При этом, как мы знаем, весь процесс сводится к перекачке энергии из одного накопителя в другой.

В самом деле, в момент, когда заряд конденсатора наибольший, а ток в контуре отсутствует, вся энергия контура сосредоточена в конденсаторе в виде электростатической энергии. По мере разряда конденсатора увеличивается ток в контуре, и электростатическая энергия заряда постепенно превращается в магнитную энергию тока. Иначе говоря, энергия постепенно перекачивается из одного накопителя — конденсатора, в другой накопитель — катушку индуктивности. В следующую четверть периода, когда конденсатор заряжается в противоположном направлении, снова энергия перекачивается из одного накопителя в другой — из катушки индуктивности в конденсатор. Таким образом, колебания синусоидальной формы с точки зрения энергии представляют собой процесс периодической перекачки энергии из одного типа накопителя в другой.

В ламповом генераторе синусоидальных колебаний, если затухание колебательного контура мало, процесс поддержания колебаний сводится в основном также к перекачке энергии из одного накопителя в другой. Небольшие потери энергии, которые при этом происходят в контуре, пополняются благодаря обратной связи. Именно потому, что процесс колебаний сводится в основном к перекачке энергии из одного накопителя в другой, колебания в ламповом генераторе по форме близки к синусоидальным. Если же затухание контура значительно, то процесс колебаний уже существенно отличается от процесса перекачки энергии, так как только часть энергии поступает из одного накопителя в другой, а другая часть прямо из анодной цепи лампы попадает в один из накопителей.

Поэтому при большом затухании колебательного контура лампового генератора колебания в нем могут быть по форме существенно отличны от синусоидальных.

Итак, колебательный процесс, который представляет собой перекачку энергии из одного резервуара в другой, должен иметь форму, близкую к синусоидальной. Но для того чтобы перекачка энергии была возможна, нужно прежде всего два накопителя энергии. Кроме того, в простейших случаях эти накопители должны быть разнотипны — емкость и индуктивность. В случае двух однотипных резервуаров энергии, например, в случае двух емкостей, соединенных параллельно, энергия не будет перекачиваться из одного конденсатора в другой, а сразу распределится между двумя конденсаторами пропорционально их емкости. Вот почему для генератора синусоидальных колебаний так характерно наличие двух разнотипных накопителей энергии [1], а для генератора релаксационных колебаний — наличие либо одного накопителя, либо двух однотипных накопителей энергии.

В дальнейшем мы рассмотрим более сложные случаи, где этот характерный признак двух типов генераторов непосредственно неприменим, а сейчас, для того чтобы пояснить все сказанное, рассмотрим механическую модель релаксационного генератора.

18. МЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Из сопоставления электрических генераторов синусоидальных и релаксационных колебаний нетрудно установить, чем должен отличаться генератор механических релаксационных колебаний от генератора механических синусоидальных колебаний и при каких условиях маятник Жуковского должен будет совершать релаксационные колебания.

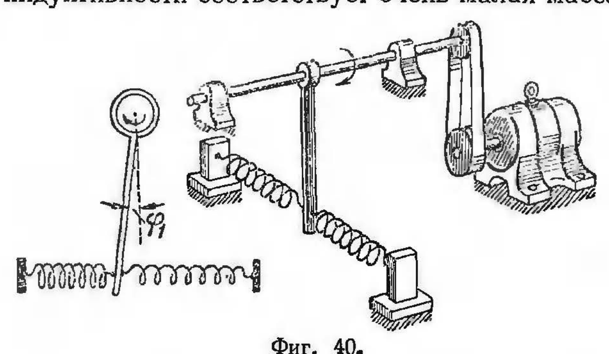
Когда мы рассматривали маятник Жуковского как модель лампового генератора синусоидальных колебаний, мы должны были, очевидно, в этой модели потери энергии, а значит и трение между втулкой и валом считать малыми.

---

[1] Для того чтобы колебания по форме были близки к синусоидальным, нужно соблюдение еще одного условия — накопителями энергии должны бы быть постоянные емкости и постоянные индуктивности, т. е. емкости, величина которых не зависит от заряда, и индуктивности, величина которых не зависит от величины тока. Например, катушка индуктивности со стальным сердечником, величина индуктивности которой зависит от величины проходящего тока, может дать колебания, по форме существенно отличные от синусоидальных даже в обычном колебательном контуре, но мы таких случаев в нашей книге рассматривать не будем.

Тогда колебания маятника были бы близки к случаю, когда потери отсутствуют, т. е. когда происходит в чистом виде перекачка энергии и колебания по форме близки к синусоидальным.

В рассмотренном выше электрическом случае (в схеме с неоновой лампой) колебания имели резко несинусоидальную форму, при этом индуктивность в цепи отсутствовала [1], а сопротивление было велико. В механической модели очень малой индуктивности соответствует очень малая масса маят-



Фиг. 40.

ника, а очень большому сопротивлению соответствует очень сильное трение втулки о вал. Но, сделав массу маятника малой, а трение большим, нужно будет ввести еще одно усовершенствование в нашу модель.

Дело в том, что при малой массе сила тяжести, которая удерживает маятник вблизи нижнего отвесного положения, будет очень мала, и вследствие большого трения маятник будет просто вращаться вместе с валом. Чтобы помешать этому, нужно укрепить маятник в нижнем положении пружинами (фиг. 40).

Итак, по аналогии с тем, что мы знаем об электрических релаксационных колебаниях, следует ожидать, что маятник Жуковского небольшой массы, укрепленный на втулке, которая с значительным трением сидит на вращающемся валу, и удерживаемый около положения равновесия достаточно тугими пружинами, может совершать механические релаксационные колебания.

---

[1] Точнее говоря, в цепи неоновой лампы отсутствует сосредоточенная индуктивность, но провода цепи обладают некоторой небольшой собственной индуктивностью. К роли этой паразитной индуктивности мы еще вернемся.

Опыт вполне подтверждает эти ожидания. Подобрав так материалы втулки и вала, чтобы характеристика трения имела падающий участок, а скорость вращения вала так, чтобы она лежала в пределах этого падающего участка, можно на только что описанной модели получить незатухающие колебания, по форме резко отличные от синусоидальных.

Механические релаксационные колебания для нас представляют интерес как модель электрических релаксационных колебаний. Рассмотрев более детально эту модель и, в частности, роль отдельных элементов (массы, упругости и трения) в ней, мы гораздо лучше уясним себе роль отдельных элементов генератора электрических релаксационных колебаний.

Итак, рассмотрим, какую роль играют отдельные элементы — масса, упругость и трение — в различных типах механических незатухающих колебаний. Для этого нам нужно начать с основных законов механики.

Как известно, второй закон Ньютона гласит, что всякое тело, находящееся под действием сил, испытывает ускорение, величина которого равна сумме действующих сил, разделенной на массу тела. Поэтому, если масса тела не очень мала, а сумма действующих на него сил не очень велика, то ускорение тела не может быть очень большим, иначе говоря, скорость тела может изменяться только постепенно, а не резко. Но чем меньше масса тела при тех же самых действующих на него силах, тем больше ускорение тела, т. е. тем резче может изменяться скорость тела. А когда масса тела очень мала, скорость тела может изменяться очень резко, скачком. Такие резкие изменения скорости будут происходить только до тех пор, пока сумма сил, действующих на тело, не равна нулю. Если же по каким-либо причинам сумма сил, действующих на тело, окажется близкой к нулю, то в соответствии со вторым законом Ньютона, несмотря на то, что масса тела очень мала, ускорение тела уже не будет большим, т. е. резкие изменения скорости прекратятся.

Таким образом, в случае, когда масса тела очень мала, можно выделить два предельных типа движений: во-первых, очень резкие изменения скорости — «скачки скорости», когда сумма действующих на тело сил велика, во-вторых, движения без резких изменений скорости, когда сумма действующих на тело сил приблизительно равна нулю. Конечно, эти два типа движений не всегда разделены между собой со-

вершенно резкой границей — иногда они постепенно переходят одно в другое. Но всегда, в случаях, когда масса тела достаточно мала, можно более или менее отчетливо разделить все движения тела на эти два типа. В случае же, когда масса тела не мала и, значит, играет все время существенную роль в движении, такое разделение невозможно, так как ускорение никогда не бывает большим и скорость нигде не меняется резко.

Возможность или невозможность разделения всех движений тела на два типа — движений с очень большими или очень малыми ускорениями — в случае колебаний непосредственно связана с формой этих колебаний. Действительно, если форма колебаний близка к синусоидальной, то скорость и ускорение везде меняются плавно. Нет таких областей, где ускорение очень велико, нет и областей, где скорость меняется сразу резко, скачком. В случае же релаксационных колебаний всегда существуют такие области, где скорость сразу изменяется очень резко—это точки, где наклон кривой, изображающей колебания, резко изменяется [1]. Сама форма релаксационных колебаний — пилообразных или столообразных, или вообще изображаемых не плавными кривыми, а ломаными линиями — в случае механических колебаний говорит о наличии резких, скачкообразных изменений скорости.

Изложив эти общие соображения, рассмотрим теперь на конкретном примере описанной выше модели, как происходят эти резкие изменения скорости. Напомним, что если скорость вращения вала подобрана так, что она приходится на падающий участок характеристики, то, как было показано, состояние равновесия оказывается неустойчивым [2].

Само положение равновесия определяется из условия, что упругая сила пружины, действующая на маятник Жуковского, уравновешивает силу трения, действующую на втулку со стороны вала. Следовательно равновесие наступит, когда маятник сместится на соответствующий угол φ

---

[1] Если кривая колебаний изображает зависимость смещения колеблющегося тела от времени, то наклон этой кривой определяет скорость колеблющегося тела, и поэтому точкам, где наклон кривой резко изменяется, соответствуют резкие изменения скорости тела.

[2] Устойчивость или неустойчивость состояния равновесия определяются только характеристикой сил и не зависят от массы маятника. Поэтому условия, которыми определялись устойчивость или неустойчивость состояния равновесия для маятника Жуковского с большой массой, применимы и к маятнику с малой массой.

в направлении вращения вала (фиг. 40). Но вследствие неустойчивости состояния равновесия маятник в этом положении не останется. Первый же случайный толчок заставит его начать двигаться либо по направлению вращения вала, либо против этого направления (в зависимости от направления случайного толчка).

Положим для определенности, что толчок был направлен в сторону движения вала и, значит, маятник начнет догонять вал. При этом относительная скорость втулки и вала уменьшится, и так как характеристика трения падающая, то сила трения между втулкой и валом будет расти. Вследствие этого скорость маятника будет резко возрастать, и она скоро достигнет той скорости, с которой движется вал. С этого момента рост скорости маятника должен прекратиться, так как вал не может ускорять маятника после того, как их скорость стала одинаковой. Но двигаясь вместе с валом, маятник все больше и больше натягивает пружину, которая его удерживает, а значит сила, действующая на него со стороны пружины, будет все время возрастать.

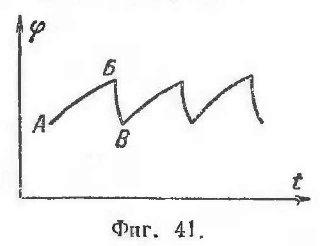
Но сила трения между валом и втулкой не может превысить некоторой определенной величины, зависящей от свойств их поверхностей и давления между ними. Поэтому наступит момент, когда сила, действующая со стороны пружины, станет больше, чем сила трения, действующая со стороны вала, и значит, скорость маятника начнет очень быстро изменяться в обратном направлении. Маятник начнет с большой скоростью скользить против направления вращения вала по направлению к положению равновесия. Относительная скорость втулки и вала резко возрастет и соответственно изменится сила трения между втулкой и валом.

Так как при больших скоростях характеристика трения поднимающаяся, то при возрастании относительной скорости сила трения возрастает. С другой стороны, так как маятник движется по направлению к положению равновесия, то сила, действующая на него со стороны пружины, все время уменьшается. Значит, наступит момент, когда сила трения окажется уравновешенной той силой, которая действует на маятник со стороны пружины. В этот момент резкие изменения скорости должны прекратиться.

Но движение маятника против направления движения вала не прекратится, а лишь начнет постепенно замедляться. Такое постепенное, а не резкое изменение скорости на этом участке возможно. В самом деле, при уменьшении скорости маятника уменьшается и относительная скорость

втулки и вала (так как они движутся навстречу), а значит уменьшается сила трения (при больших скоростях характеристика трения имеет поднимающийся участок). С другой стороны, уменьшается и сила, действующая со стороны пружины, так как маятник движется по направлению к положению равновесия. Поскольку обе силы при этом движении уменьшаются, равновесие между ними может не нарушаться, и значит, может происходить движение с плавно меняющейся скоростью.

Но это возможно только до тех пор, пока относительная скорость не уменьшится до значения, от которого начинается падающий участок характеристики. Дальше равновесие между силами не может сохраняться, так как сила трения начнет увеличиваться, а упругая сила все еще попрежнему будет уменьшаться. Вследствие этого опять начнутся резкие изменения скорости, а так как преобладать будет сила трения (которая возрастает), то появившееся большое ускорение будет направлено в сторону движения вала, и очень скоро маятник достигнет скорости, равной скорости вала, и начнет двигаться вместе с ним. Пройдя некоторый путь вместе с валом, маятник опять сорвется и начнет скользить против его движения, т. е. снова будут происходить те движения, с которых мы начали наше рассмотрение. Следовательно, дальше процесс будет повторяться.



Фиг. 41.

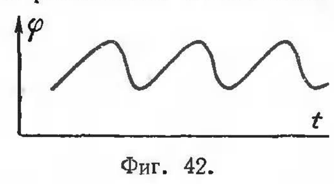
Таким образом, колебания маятника (фиг. 41) будут состоять из двух движений без резких изменений скорости — это будут движения вместе с валом (участки *АБ*) и движения против вращения вала (участки *БВ*) и из двух резких (скачкообразных) изменений скорости на границах этих участков (в точках *Б* и *В*, где скорость резко меняется, изменяя свое направление).

Как уже было отмечено, изменения скорости в рассмотренных колебаниях могут происходить очень быстро, скачкообразно, только тогда, когда масса очень мала. Чем больше масса маятника, тем меньше ускорения маятника (так как сила трения и упругая сила сохраняют прежние значения) и тем менее резкими становятся изменения скорости. Это значит, что резкие изломы на кривой, изображающей форму колебаний, исчезают, колебания все более и более сглажи-

ваются и все менее и менее похожи на релаксационные (фиг. 42).

Ясно, что при постепенном увеличении массы маятника мы должны перейти от релаксационных колебаний к синусоидальным. Ведь если массу маятника сделать очень большой, то мы снова вернемся к обычному маятнику Жуковского, который совершает колебания, по форме близкие к синусоидальным, т. е. к случаю, который был рассмотрен в § 10.

Релаксационные колебания довольно часто наблюдаются в различных механизмах. Так, например, подобные колебания наблюдаются в приборах для измерения сил трения — так называемых трибометрах, в тормозных колодках вагонов и т. д. Поэтому изучение механических релаксационных колебаний с целью выяснения условий их возникновения и методов устранения представляет интерес с точки зрения многих задач машиноведения, приборостроения и т. д. Однако в рамках нашей книги механические релаксационные колебания представляют собой лишь модель, на которой можно выяснить основные черты явления, а затем воспользоваться этой моделью для пояснения некоторых особенностей электрических релаксационных колебаний. Этим мы сейчас и займемся.



Фиг. 42.

19. „СКАЧКИ“ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Для механических релаксационных колебаний характерно наличие таких областей, где скорость тела изменяется очень резко, «скачком», однако такие скачки могут происходить только в тех случаях, когда масса тела очень мала. Нетрудно, исходя из известных аналогий между механическими и электрическими системами, перенести эти заключения на электрические релаксационные колебания.

Для того чтобы форма электрических колебаний была отличная от синусоидальной, достаточно наличие таких областей, где резко, скачком изменяется величина тока в цепи. Но для этого цепь не должна обладать сколько-нибудь заметной индуктивностью, ибо последняя, как известно, препятствует резким изменениям тока в цепи. Инерция большой массы также препятствует резким изменениям скорости этой массы, как э. д. с. самоиндукции препятствует резким изменениям тока в цепи.

Таким образом, индуктивность в электрических цепях играет такую же роль, какую играет масса в механических движениях. Так, например, в рассмотренной нами выше схеме с неоновой лампой резкие изменения тока в схеме возможны только потому, что в ней нет катушки индуктивности, а индуктивность соединительных проводов достаточно мала. Если в схему включены значительные индуктивности, то резкие изменения тока становятся невозможными и схема уже не может создавать релаксационных колебаний.

Итак, релаксационные колебания в схеме с неоновой лампой возможны только в том случае, когда индуктивность цепи очень мала. При этом сила тока в схеме изменяется скачками, но напряжение на конденсатор меняется непрерывно, не испытывая скачков. В самом деле, как мы видели, процесс заряда конденсатора сменяется процессом разряда и наоборот, но при этом конденсатор начинает разряжаться с того напряжения, до которого он зарядился, и начинает заряжаться от того напряжения, до которого он зарядился. Итак, в генератре с неоновой лампой, в котором присутствует емкость и отсутствует индуктивность, происходят скачки тока, но не происходит скачков напряжения на конденсаторе.

Этому частному выводу, полученному на основании рассмотрения одной конкретной схемы, можно придать более общий характер, если рассмотреть весь вопрос с точки зрения энергии системы.

Как уже указывалось, в электрических цепях энергия может запасаться либо в виде энергии электрического поля (электростатической энергии) в заряженном конденсаторе, либо в виде энергии магнитного поля, возникающего вокруг катушек индуктивности, когда по ним протекает электрический ток. И если мы считаем, что цепь не обладает индуктивностью, то это значит, что система не запасает энергии в виде энергии магнитного поля.

Конечно, в действительности вокруг всякого проводника с током существует магнитное поле, и значит, всякая схема, в которой текут токи, обладает некоторой индуктивностью и некоторым запасом магнитной энергии. Поэтому во всякой реальной схеме не могут происходить скачки тока в буквальном смысле этого слова. Скачки тока, о которых мы говорили выше, — это очень быстрые изменения силы тока, происходящие за очень короткое время, но все же не мгновенно. Но если в схеме есть только отдельные короткие

проводники и отсутствуют катушки индуктивности, то индуктивность цепи, а значит и запас магнитной энергии в схеме очень малы и ими вполне можно пренебречь по сравнению с запасом электрической энергии в конденсаторе схемы. Именно так обстоит дело в рассмотренной схеме с неоновой лампой.

Если в такой схеме мы пренебрегаем индуктивностью цепи, то предположение, что в этой цепи происходят скачки тока, не приводит к скачкообразным изменениям энергии, запасенной в схеме. В самом деле, поскольку мы предполагаем, что схема не запасает магнитной энергии, то скачки тока в ней не изменяют количества энергии, запасенной в цепи. Но если бы мы предположили, что в схеме возможны скачки напряжения на зажимах конденсатора, то это значит, что мы допустили бы возможность скачкообразных изменений запаса энергии в схеме. Однако в действительности этого никогда не происходит.

Опыт показывает, что резкие скачки тока или напряжения в электрических цепях возможны только в тех случаях, когда эти скачки не связаны со скачкообразными изменениями запасенной в цепи энергии. Это значит, что не могут изменяться скачком напряжение на конденсаторе или ток в катушке индуктивности. Но зато могут изменяться скачком: 1) величина тока, заряжающего или разряжающего конденсатор (конечно, если в зарядной или разрядной цепи нет катушки индуктивности); 2) э. д. с. на зажимах катушки индуктивности (опять-таки, если параллельно катушке не включен конденсатор, так как тогда напряжение на нем должно равняться э. д. с. самоиндукции) и 3) величина тока, текущего через активное сопротивление (если последовательно с ним не включена катушка индуктивности), а значит вместе с тем и напряжение на концах этого активного сопротивления (опять-таки, если параллельно активному сопротивлению не включена емкость). В таком общем виде эти соображения применимы к любой электрической схеме. А так как наличие скачков тока или напряжения является характерным признаком релаксационных колебаний (ибо если скачков нет, то, значит, токи и напряжения меняются плавно), то приведенные выше соображения позволяют решить вопрос о том, возможны ли в данной схеме релаксационные колебания или нет.

При рассмотрении конкретных схем релаксационных генераторов, полезно применять эти, а также следующие соображения.

Как было отмечено, для релаксационных схем характерно наличие только одного накопителя энергии или во всяком случае одного типа накопителей энергии. Но, как мы видели только что, наличие накопителей энергии в цепи делает невозможными скачкообразные изменения тех величин (токов или напряжений), которыми определяется количество энергии, запасенной в накопителе. Таким образом, число и тип накопителей энергии определяют не только возможность перекачки энергии, т. е. возможность существования синусоидальных колебаний, но и возможность существования скачков токов или напряжений, т. е. возможность существования релаксационных колебаний.

В простейшем случае наличие в схеме только одного накопителя энергии, например, конденсатора, исключает возможность перекачки энергии, но зато оставляет открытой возможность скачкообразных изменений тока в цепи. Введение в эту цепь катушки индуктивности, т. е. накопителя энергии другого типа, открывает возможность перекачки энергии, но зато исключает возможность скачкообразных изменений тока в цепи.

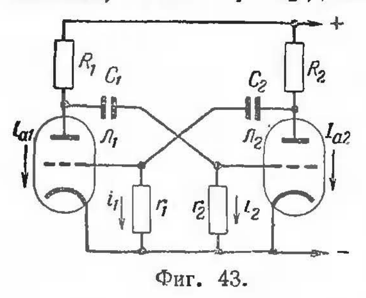
В случаях наличия нескольких накопителей энергии дело обстоит обычно сложнее, и нельзя высказать общего правила о том, как влияет добавление к схеме еще одного накопителя энергии. Но и в этих более сложных случаях все же вопрос о возможности существования синусоидальных или релаксационных колебаний сводится к рассмотрению влияния тех или других накопителей энергии. Некоторые примеры такого рассмотрения будут приведены ниже.

20. РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НА ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ

Рассмотренная выше схема с неоновой лампой является простейшим релаксационным генератором, на котором наиболее наглядно могут быть показаны характерные черты релаксационных колебаний. Однако на практике применяются главным образом релаксационные генераторы на электронных лампах, и поэтому мы рассмотрим одну из типичных схем релаксационных генераторов на электронных лампах, а именно двухтактную схему генератора, которую часто называют мультивибратором (фиг. 43).

Положим для простоты, что схема вполне симметрична, т. е. что все элементы и лампы $Л_1$ и $Л_2$ в обоих плечах одинаковы (хотя иногда бывает выгодно применять и несимметричные двухтактные схемы). Положим также, что не

только схема симметрична, но что в начальный момент в ее ветвях текут одинаковые токи. Далее будем считать, что сеточные токи отсутствуют и, следовательно, в сеточных сопротивлениях r_1 и r_2 могут протекать только переменные токи (так как эти токи должны течь через конденсаторы C_1 и C_2). Иначе говоря, если схема находится в состоянии равновесия, то токи i_1 и i_2 должны быть равны нулю, а это значит, что равны нулю напряжения на сетках обеих ламп. Тогда через сопротивления R_1 и R_2 текут анодные токи I_{a1} и I_{a2}, соответствующие напряжению на сетке, равному нулю. Это и есть состояние равновесия схемы.



Фиг. 43.

Однако, для того чтобы схема могла длительно находиться в этом состоянии равновесия, оно должно быть устойчиво, т. е. небольшие случайные изменения величин токов в цепях не должны вызывать дальнейших отклонений от положения равновесия. Рассмотрим с этой точки зрения поведение схемы.

Положим, что по каким-либо случайным причинам произошло увеличение анодного тока первой лампы I_{a1}. Вследствие этого возрастет ток в сопротивлении R_1, увеличится падение напряжения на этом сопротивлении, а значит упадет напряжение на аноде лампы $Л_1$. В состоянии равновесия конденсатор C_1 заряжен до напряжения, равного напряжению на аноде лампы (так как ток, а значит и падение напряжения в сопротивлении r_2 равны нулю). Поэтому, если напряжение на аноде лампы $Л_1$ упадет, то конденсатор начнет разряжаться. Этот ток разряда будет протекать через сопротивление r_2 и создаст на нем падение напряжения, минус которого будет лежать у сеточного, а плюс у катодного конца сопротивления (так как при разряде конденсатора отрицательные заряды будут протекать от сетки к катоду). Появление отрицательного напряжения на сеточном конце сопротивления r_2 вызовет уменьшение анодного тока лампы $Л_2$. Вследствие этого уменьшится падение напряжения на сопротивлении R_2 и возрастет напряжение на аноде лампы $Л_2$. Конденсатор C_2, заряженный ранее до начального напряжения на аноде лампы, начнет подзаряжаться, и ток заряда будет протекать по сопротивлению r_1, создавая на нем падение напряжения. Так как это ток заря-

да, то он будет создавать на сопротивлении r_1 напряжение, противоположное тому, которое создает ток разряда на сопротивлении r_2, т. е. положительное на сеточном конце и отрицательное на катодном. Таким образом, случайное увеличение анодного тока лампы $Л_1$, действуя через лампу $Л_2$, вызывает появление положительного напряжения на сетке лампы $Л_1$.

Легко убедиться, что также будет обстоять дело при случайном уменьшении анодного тока лампы $Л_1$. Действуя через лампу $Л_2$, оно будет вызывать появление отрицательного напряжения на сетке лампы $Л_1$. Совершенно очевидно, что вследствие симметрии схемы для лампы $Л_2$ все будет обстоять так же, как и для лампы $Л_1$. Следовательно, случайное изменение анодного тока какой-либо из ламп будет вызывать появление такого напряжения на сетке этой лампы, которое может вызывать еще большее изменение анодного тока этой лампы в ту же сторону, в какую направлено возникшее вначале случайное изменение. Для этого нужно, однако, чтобы изменение анодного тока, обусловленное возникшим напряжением на сетке, было бы больше, чем то случайное начальное изменение анодного тока, которым это напряжение на сетке было вызвано. Если это условие будет выполнено, то всякое случайное изменение анодного тока породит еще большее изменение, и система в результате случайных отклонений будет все дальше и дальше уходить от состояния равновесия, т. е. состояние равновесия будет неустойчиво. Указанное только что требование (чтобы изменения анодного тока были достаточно велики), очевидно, будет соблюдено, если будут достаточно велики крутизна характеристик ламп и величины анодных сопротивлений R_1 и R_2 и сеточных сопротивлений r_1 и r_2.

В самом деле, чем больше R_1 и R_2, тем больше изменения напряжения на аноде при одном и том же изменении силы анодного тока. Далее, чем больше r_1 и r_2, тем большие напряжения на сетке создает разрядный или зарядный ток, текущий через конденсаторы. И, наконец, чем больше крутизна характеристики лампы, тем большие изменения анодного тока происходят при одних и тех же изменениях напряжения на сетке.

Расчет показывает, что для данных ламп всегда можно подобрать такие большие величины R_1, R_2, r_1 и r_2, чтобы состояние равновесия схемы оказалось неустойчивым. Практически для обычных типов ламп, для которых крутизна характеристики есть величина порядка одного или несколь-

ких миллиампер на вольт, условие неустойчивости состояния равновесия во всяком случае будет соблюдено, если значения $R = R_1 = R_2$ и $r = r_1 = r_2$ (речь идет о симметричной схеме) таковы, что величина $\frac{rR}{r+R}$ составляет не менее нескольких тысяч ом. Для этого достаточно, чтобы каждое из сопротивлений — сеточное и анодное — имело величину порядка нескольких тысяч ом. Таким образом, при сколько-нибудь значительных величинах сопротивлений r и R рассматриваемая схема оказывается неустойчивой.

Проследим теперь за тем, что происходит со схемой после того, как некоторое случайное отклонение в ней начало нарастать. Для этого необходимо учитывать, что при изменении напряжений на сетках ламп изменяется и крутизна характеристики.

Будем рассматривать только такой случай, когда рабочая точка лежит в середине характеристики, т. е. когда в обе стороны от рабочей точки крутизна характеристики уменьшается. Поведение схемы в любой точке определяется крутизной характеристики ламп в данной точке. В рассматриваемой двухтактной схеме напряжения на сетках ламп меняются в противоположные стороны, — если на одной сетке появляется положительное напряжение, то на другой появляется отрицательное. Поскольку схему мы считаем симметричной, а рабочую точку расположенной в симметричной точке характеристики, то при одинаковом изменении напряжений на сетках ламп в противоположные стороны крутизна их характеристик будет изменяться одинаково. Поэтому мы можем считать, что при проявлении противоположных напряжений на сетках ламп крутизна их характеристик уменьшается, так как в рабочей точке, т. е. при отсутствии напряжений на сетках, она наибольшая.

Итак, посмотрим, как изменяется поведение схемы при уменьшении крутизны характеристик ламп. При большой крутизне, как мы видели, будет соблюдено условие неустойчивости состояния равновесия и, выйдя из этого состояния, схема будет продолжать уходить из него до тех пор, пока крутизна характеристики будет достаточно велика. Иначе говоря, во всей области, где крутизна характеристики достаточно велика, система будет вести себя так же, как вблизи неустойчивого состояния равновесия, т. е. будут происходить такие изменения токов и напряжений в схеме, которые удаляют ее от состояния равновесия.

В тех же областях, где крутизна характеристики уже

столь мала, что при этой крутизне состояние равновесия схемы было бы устойчиво, схема будет вести себя по-другому, а именно так, что все движения в системе, т. е. все изменения токов и напряжений в ней будут происходить в таком направлении, что они будут приближать схему к состоянию равновесия. Иными словами, вдали от состояния равновесия, т. е. в области, где крутизна характеристики мала, токи i_1 и i_2 должны уменьшаться по абсолютной величине, вблизи же от состояния равновесия, в области, где крутизна характеристики велика, токи i_1 и i_2 должны по абсолютной величине возрастать (при этом вследствие симметрии схемы токи i_1 и i_2 всегда изменяются в противоположные стороны).

Следовательно, где-то, при определенном значении крутизны характеристики эти два типа движений должны сменять друг друга, т. е. должна существовать некоторая граница, к которой направлены все движения системы, как изнутри — от состояния равновесия, так и снаружи — из областей, далеких от состояния равновесия. Наконец, помимо этих движений, т. е. плавных изменений сил токов, в схеме могут происходить и очень резкие, скачкообразные изменения токов (поскольку индуктивности в схеме отсутствуют). Но эти скачки токов должны происходить так, чтобы напряжения на конденсаторах не изменялись во время скачка, т. е. чтобы энергия, запасенная в схеме, не изменялись бы скачком. Приведенные соображения помогут проследить за процессами, происходящими в схеме после того, как она (вследствие неизбежных случайных отклонений) уйдет далеко от состояния равновесия.

Положим для определенности, что случайное начальное отклонение соответствует возрастанию тока I_{a1}. Тогда, как мы видели, ток I_{a1} будет продолжать возрастать и дальше, ток I_{a2}, наоборот, будет уменьшаться, а токи i_1 и i_2 будут течь в противоположные стороны и оба будут возрастать по абсолютной величине. В конце концов ток I_{a1} приблизится к току насыщения, а ток I_{a2} почти упадет до нуля.

Но если ток I_{a1} приблизится к току насыщения, то, значит, дальнейшее повышение его станет невозможным, напряжение на аноде лампы $Л_1$ перестанет падать, конденсатор C_1 перестанет разряжаться, и ток i_2 прекратится. Вместе с тем исчезнет и созданное этим током отрицательное напряжение на сетке лампы $Л_2$ (именно это отрицательное напряжение и привело к тому, что лампа оказалась почти запертой).

Если запирающее напряжение на сетке лампы исчезнет, то анодный ток этой лампы сразу резко возрастет, напряжение на аноде лампы упадет, и вместо заряда конденсатор C_2 начнет разряжаться. А это значит, что на сетке лампы $Л_1$ появится большое отрицательное напряжение.

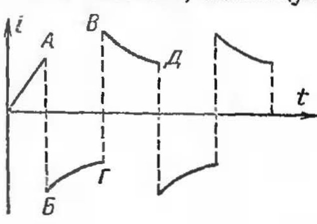
Таким образом, схема сразу «опрокинется» из состояния, в котором ток I_{a1} был близок к насыщению, а ток I_{a2} близок к нулю, в состояние, где ток I_{a1} близок к нулю, а ток I_{a2} близок к насыщению. Этот скачок переведет схему в область, не только лежащую по другую сторону от состояния равновесия, но и столь далекую от этого состояния, что все движения в ней будут направлены к состоянию равновесия. Следовательно, ток I_{a1} начнет понемногу возрастать, а ток I_{a2} — падать. При этом крутизна характеристик ламп постепенно начнет возрастать, и система снова придет в такое состояние, когда она должна опрокинуться, т. е. перейти через состояние равновесия в далекую область, лежащую по другую сторону от состояния равновесия, откуда она опять должна начать двигаться к состоянию равновесия. Приблизившись несколько к состоянию равновесия, система снова опрокидывается, переходя в область, лежащую по другую сторону от состояния равновесия.

Таким образом, система совершает периодически повторяющийся процесс (т. е. колебания), который состоит из двух сравнительно медленных движений в областях, где крутизна характеристики мала, и двух очень быстрых движений (скачков), через область, где крутизна характеристики велика. Медленные движения происходят в областях, далеких от положения равновесия, и направлены к положению равновесия, быстрые же движения представляют собой скачки через область, в середине которой лежит положение равновесия. Возникают эти колебания в том случае, когда состояние равновесия оказывается неустойчивым (если бы состояние равновесия было устойчивым, то схема не ушла бы из него и колебания бы не возникли). Таким образом, условие неустойчивости состояния равновесия есть вместе с тем условие самовозбуждения колебаний в схеме.

На основании всего сказанного мы можем теперь изобразить графически изменения какого-либо из токов в рассматриваемой схеме, например, одного из токов i_1 или i_2 (фиг. 44).

Непосредственно после включения под действием случайного толчка этот ток начинает расти. Дойдя до границы

двух типов движений, ток от значения, соответствующего точке *А*, изменяется скачком, и его значение перескакивает в область, лежащую за второй границей двух типов движений (точка *Б*). Далее ток начинает уменьшаться (движение к состоянию равновесия) и достигает границы двух типов движений (точка *Г*), совершает скачок в область, лежащую за другой границей двух типов движений (точка *В*), движется к границе двух типов движений (точка *Д*), перескакивает в область, лежащую по другую сторону от другой границы, и т. д.



Фиг. 44.

Период рассматриваемых колебаний определяется, очевидно, продолжительностью сравнительно медленных движений от *Б* до *Г* и от *В* до *Д*. А так как эти движения представляют собой в сущности выравнивание напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 через цепь, состоящую из сопротивлений R и r, то скорость этого процесса выравнивания определяется временной постоянной цепи, т. е. величиной $C(R+r)$. Изменяя величины емкостей C_1 и C_2 и сопротивлений R_1, R_2, r_1 и r_2 можно в широких пределах изменять период колебаний мультивибратора. При этом, однако, величины R_1, R_2, r_1 и r_2, нельзя выбирать слишком малыми, так как тогда не будут соблюдены условия возбуждения колебаний.

Рассмотренная нами схема мультивибратора является одной из типичных схем релаксационных генераторов, но существует еще ряд других схем с электронными лампами, применяемых для получения релаксационных колебаний. Однако мы не будем рассматривать этих схем, так как происходящие в этих схемах процессы и механизм возникновения колебаний в принципе аналогичны только что рассмотренному.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ДВА СПОСОБА ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

21. ДВА ТИПА ГЕНЕРАТОРОВ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Обычный ламповый генератор и мультивибратор, рассмотренные нами выше, являются представителями двух различных типов генераторов незатухающих колебаний.

Различие между ними заключается прежде всего в различной форме генерируемых колебаний. В то время как первый генерирует колебания, по форме близкие к синусоидальным, второй создает колебания, резко несинусоидальные по форме.

С другой стороны, и в схемах этих генераторов также есть существенные различия. В ламповый генератор в качестве одного из основных элементов входит колебательный контур, в мультвибраторе же такой контур отсутствует. Наконец, и с точки зрения механизма возбуждения колебаний эти генераторы также различны. В ламповом генераторе незатухающие колебания получаются как результат компенсации затухания собственных колебаний в колебательном контуре, в мультивибраторе же незатухающие колебания получаются как результат периодического повторения процессов заряда и разряда конденсаторов.

Все эти различия, конечно, тесно связаны между собой. Однако эта связь не является очень жесткой. Существуют, например, схемы, которые хотя и не содержат в явном виде колебательных контуров, но создают колебания, по форме очень близкие к синусоидальным.

Помимо того, что указанные признаки различия двух типов генераторов не являются вполне жесткими, самая граница между двумя указанными типами генераторов не всегда бывает резкой. Существуют и промежуточные типы генераторов, которые нельзя однозначно отнести к тому или другому типу. Существуют также и такие генераторы, которые плавным изменением каких-либо из их параметров (например, сопротивления или обратной связи) можно перевести из одного типа в другой.

Поэтому нельзя пытаться все разнообразнейшие типы генераторов незатухающих колебаний разделить на два совершенно обособленных типа генераторов, и тем более провести это разделение по какому-либо одному, единственному признаку. И все же при рассмотрении всех многочисленных генераторов незатухающих колебаний, применяемых на практике, в большинстве случаев каждый из них оказывается ближе к тому или другому из двух рассмотренных основных типов генераторов.

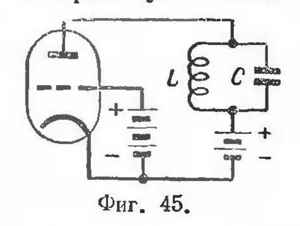
Рассмотрение различных типов генераторов незатухающих колебаний с такой точки зрения полезно потому, что, выделив у рассматриваемого генератора черты сходства с тем или иным из двух основных типов генераторов, мы без детального изучения получаем сразу представление

о принципе действия и свойствах рассматриваемого генератора. В следующих параграфах мы кратко рассмотрим под этим углом зрения еще несколько наиболее употребительных типов генераторов незатухающих колебаний.

22. ДИНАТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

С точки зрения механизма возбуждения незатухающих колебаний наиболее близкими к обычному ламповому генератору являются так называемые динатронные генераторы. Поэтому с них мы и начнем наше рассмотрение.

Схема динатронного генератора на трехэлектродной лампе приведена на фиг. 45. Лампа поставлена в так называемый динатронный режим, при котором увеличение анодного напряжения в некоторых пределах приводит не к увеличению, а к уменьшению силы анодного тока.



Фиг. 45.

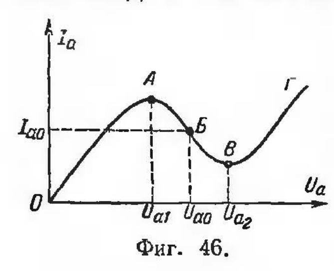
Мы не рассматривали раньше процессов, происходящих в самой лампе, и не объясняли, почему лампы обладают характеристиками определенного вида, но в данном случае сделаем отступление для того, чтобы объяснить происхождение падающего участка на анодной характеристике лампы.

Если электроны достигают анода с достаточно большой скоростью, то при ударе об анод они могут выбить из него один или несколько электронов. Явление это называется вторичной эмиссией, а выбиваемые электроны называются вторичными электронами. Вторичные электроны, вылетев из анода, попадают под действие электрического поля, существующего между анодом и сеткой. Если напряжение на аноде выше, чем напряжение на сетке, то поле между сеткой и анодом заставляет вторичные электроны возвращаться на анод, и поэтому они не влияют на силу анодного тока. Если же напряжение на сетке выше, чем напряжение на аноде, то вторичные электроны, вылетевшие из анода, притягиваются сеткой и создают в лампе ток, направленный навстречу анодному току.

Ток во внешней цепи, присоединенной к аноду, равен разности электронного анодного тока и тока вторичных электронов, и если при увеличении анодного напряжения ток вторичных электронов возрастет быстрее, чем анодный ток (это возможно, если по мере увеличения напряжения на аноде растет число вторичных электронов, выбиваемых

каждым первичным), то ток в присоединенной к аноду внешней цепи по мере увеличения анодного напряжения не растет, а уменьшается.

Такой режим может быть осуществлен в трехэлектродной лампе, если на ее сетку подано достаточно высокое положительное напряжение. Тогда по мере увеличения напряжения на аноде сначала анодный ток будет возрастать, так как пока напряжение на аноде мало, электроны достигают анода с небольшими скоростями, и явление вторичной эмиссии отсутствует. На графике, изображающем зависимость анодного тока от напряжения на аноде (фиг. 46), этому соответствует участок *ОА*.



Фиг. 46.

Но когда напряжение на аноде превзошло некоторую величину, возникает явление вторичной эмиссии и по мере увеличения анодного напряжения число вторичных электронов начинает резко возрастать. Если при этом напряжение на аноде все еще меньше, чем напряжение на сетке, то вторичные электроны притягиваются сеткой, образуют ток обратного направления и уменьшают величину тока в анодной цепи лампы (это явление называется динатронным эффектом). На графике фиг. 46 этому соответствует падающий участок кривой *АВ*.

Далее, когда напряжение на аноде возрастет настолько, что оно приблизится к напряжению на сетке, все меньше и меньше вторичных электронов будет притягиваться сеткой, и, следовательно, ток в анодной цепи снова начнет возрастать (участок кривой *ВГ*).

Если режим лампы выбран так, что ее рабочая точка лежит на падающем участке характеристики, например в точке *Б*, то говорят, что лампа работает в динатронном режиме. В этом режиме увеличение анодного напряжения сопровождается уменьшением анодного тока и наоборот.

Если напряжение на аноде меняется в некоторых пределах около значения U_{a0}, то, как и всегда, мы можем рассматривать анодный ток на участке *АВ* как сумму двух составляющих — постоянной I_{a0} и переменной, которая слева от точки *Б* направлена в ту же сторону, что и постоянная составляющая, а справа от точки *Б* в противоположную сторону. Иначе говоря, когда переменная составляющая анодного напряжения имеет положительное зна-

чение, переменная составляющая анодного тока имеет отрицательное значение и наоборот, а так как во всякой цепи отношение напряжения к силе тока равно сопротивлению этой цепи, то, поскольку в рассматриваемом случае знаки их противоположны, для переменной составляющей сопротивление лампы в динатронном режиме отрицательно.

Но если данный проводник в некоторой области напряжений представляет собой отрицательное сопротивление, то, как мы уже знаем, при прохождении тока по этому проводнику не только не затрачивается энергия от внешнего источника, но, наоборот, проводник отдает часть энергии во внешнюю цепь. Поэтому, если к лампе, работающей в динатронном режиме, присоединена какая-либо внешняя цепь и в лампе и этой цепи протекает переменный ток, то внешняя цепь получает энергию от лампы (энергия эта черпается от батарей, задающих постоянные напряжения на сетку и анод лампы).

В частности, если к лампе, работающей в динатронном режиме, присоединен последовательно колебательный контур и в этом контуре возникли случайно небольшие колебания, то лампа будет отдавать энергию колебательному контуру. Тем самым она в той или иной мере будет компенсировать потери в колебательном контуре. И если энергия, поступающая из лампы в контур, превосходит потери энергии в самом контуре, то возникшие в контуре колебания будут нарастать.

Вопрос о том, что преобладает — потери энергии в контуре или энергия, отдаваемая контуру лампой, определяется соотношением между абсолютными величинами положительного активного сопротивления контура и отрицательного сопротивления лампы.

Если отрицательное сопротивление лампы в динатронном режиме по абсолютной величине будет больше, чем активное сопротивление включенного последовательно с ней колебательного контура, то общее сопротивление цепи будет отрицательно. И так же, как и в случае обычного лампового генератора с обратной связью, это означает, что состояние равновесия неустойчиво и что случайно возникшие в контуре колебания будут нарастать. Это нарастание колебаний будет продолжаться до тех пор, пока общее сопротивление цепи будет оставаться отрицательным. Но, как уже отмечалось, отрицательным сопротивлением всякий проводник может обладать только в некоторой ограничен-

ной области. В частности, лампа в динатронном режиме обладает отрицательным сопротивлением только в пределах тех анодных напряжений, которым соответствует падающий участок характеристики *AB*. И если колебания в контуре будут нарастать, то переменное напряжение на аноде лампы непременно рано или поздно возрастет настолько, что будет приближаться к значениям U_{a1} и U_{a2} (фиг. 46), в которых сопротивление лампы из отрицательного становится положительным. Вблизи точек *A* и *B* крутизна падающего участка характеристики уменьшается, т. е. абсолютная величина отрицательного сопротивления лампы становится меньше. Поступление энергии в колебательный контур замедлится, а так как потери энергии в контуре по мере роста амплитуды все время увеличиваются, то в конце концов нарастание колебаний прекратится. В контуре установятся незатухающие колебания, причем амплитуда этих колебаний будет как раз такая, при которой потери энергии за период будут равны энергии, отдаваемой контуру лампой, т. е. отрицательное сопротивление лампы будет изменяться в таких пределах, что его среднее значение за период будет как раз равно по абсолютной величине положительному активному сопротивлению колебательного контура.

Как мы видим, принцип возбуждения незатухающих колебаний в динатронном генераторе сводится к компенсации затухания колебательного контура, т. е. аналогичен принципу возбуждения незатухающих колебаний в обычном ламповом генераторе с обратной связью[1]. Так же как в случае лампового генератора, если затухание контура невелико, то, несмотря на то, что компенсация затухания осуществляется не для каждого мгновения, а только в среднем за период, форма колебаний будет близка к той форме колебаний, которые происходили бы в контуре без затухания, т. е. близка к синусоидальной. Только когда затухание контура будет велико, форма незатухающих колебаний будет заметно отличаться от синусоидальной. Как и в случае обычного лампового генератора, форма колебаний в дина-

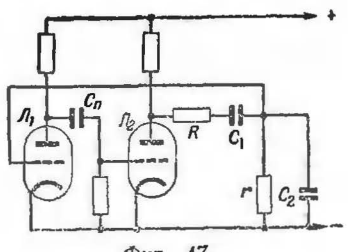
[1] Различие между динатронным генератором и обычным генератором с обратной связью сводится лишь к тому, что энергия в колебательный контур передается несколько различными способами в том и другом случае, так как по-разному протекают процессы внутри самой лампы. Однако с точки зрения проблемы возбуждения незатухающих колебаний — так, как мы ее рассматриваем, — процессы, происходящие внутри самой лампы, как уже указывалось, не играют принципиальной роли.

тронном генераторе определяется главным образом добротностью колебательного контура, входящего в генератор.

Существует ряд видоизменений рассмотренного нами динатронного генератора. Для получения падающей характеристики, т. е. для осуществления отрицательного сопротивления, часто применяют не триоды, а лампы с бо́льшим числом электродов, например пентоды. Но так как эти видоизменения по принципу возбуждения колебаний не отличаются от динатронного генератора и различаются только процессами, происходящими внутри самой лампы, мы этих других разновидностей динатронного генератора рассматривать не будем.

23. ГЕНЕРАТОРЫ НА *R* И *C*

В качестве звуковых генераторов, а также для ряда специальных целей сейчас широко применяются генераторы незатухающих колебаний, в которых отсутствуют колебательные контуры, но которые, несмотря на это, создают колебания, близкие к синусоидальным. Основными элементами схемы, определяющими частоту колебаний, в этих генераторах являются емкости и сопротивления, и поэтому такие генераторы и получили название RC-генераторов.



Фиг. 47.

На фиг. 47 приведена одна из простейших схем генераторов этого типа. Эта схема представляет собой, в сущности, двухкаскадный усилитель на сопротивлениях, у которого через сопротивление r осуществляется обратная связь с анода второй лампы на сетку первой. При некотором достаточно большом усилении лампы $Л_1$ и достаточно большом значении сопротивления r схема эта начинает генерировать незатухающие колебания, причем, пока обратная связь не сильно превышает значение, соответствующее порогу генерации, генерируемые колебания по форме близки к синусоидальным.

С той точки зрения, с которой мы предполагали рассматривать эти схемы, т. е. с точки зрения механизма возбуждения незатухающих колебаний, интересно выяснить, каким образом эта схема может генерировать колебания, близкие к синусоидальным. Прежде всего существенно, что в рассматриваемой схеме присутствуют два накопителя энер-

гии — емкости C_1 и C_2 (емкость C_n является переходной, она должна представлять собой малое сопротивление для генерируемых колебаний, и поэтому накапливающаяся в ней энергия не играет существенной роли в интересующих нас процессах).

Оба накопителя энергии (конденсаторы C_1 и C_2) принадлежат к одному типу, но они связаны между собой через лампы. При изменении напряжения на конденсаторе C_2 изменяются анодные токи первой, а через нее и второй лампы. При этом оказывается, что когда напряжение на одном из конденсаторов растет, на другом оно падает и наоборот. Иначе говоря, благодаря тому, что конденсаторы связаны между собой через лампы, процесс протекает так, как будто происходит перекачка энергии из одного конденсатора в другой, несмотря на то, что они принадлежат к одному и тому же типу накопителей энергии.

Можно сказать иначе, что благодаря повороту фазы в лампах одна из емкостей как накопитель энергии играет такую же роль, какую обычно играет индуктивность. И если, кроме того, обратная связь достаточно сильна, в схеме возникают колебания, по форме близкие к синусоидальным. Более того, при обратной связи, лежащей несколько ниже порога генерации, в этой схеме не возбуждаются незатухающие колебания, но могут происходить затухающие колебания совершенно так же, как в колебательном контуре, состоящем из емкости и индуктивности. Вследствие этого при обратной связи, несколько меньшей, чем критическая, *RC*-генератор обладает резонансными свойствами, т. е. ведет себя как обычный колебательный контур.

Опять-таки объяснить это можно так, что роль отсутствующей индуктивности заменяет емкость, связанная со схемой через лампу. При таком рассмотрении *RC*-генератор, создающий синусоидальные колебания, оказывается ближе к обычному ламповому генератору, чем к мультивибратору. Несмотря на отсутствие колебательных контуров, в нем благодаря наличию обратной связи могут происходить затухающие колебания, а при достаточно сильной обратной связи компенсируется затухание этих колебаний — они превращаются в незатухающие.

Примерно также обстоит дело и с другими *RC*-генераторами, создающими колебания, по форме близкие к синусоидальным, например многозвенными *RC*-генераторами. Правда, вследствие наличия в этих схемах более чем двух накопителей энергии — трех и более конденсаторов (с числом

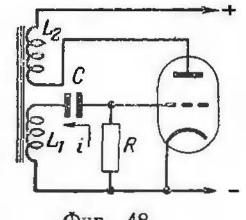
звеньев, меньшим трех, такие схемы осуществить нельзя) — для этой схемы уже нельзя применять те простые рассуждения о емкости, играющей роль индуктивности, как в предыдущем случае. И вообще, если число накопителей больше двух, то вся картина перекачки энергии становится более сложной. Но все же по принципу возбуждения колебаний этот генератор аналогичен предыдущему. Это видно из того, что в невозбужденном трехзвенном генераторе могут происходить затухающие колебания, совершенно аналогично тому, как и в предыдущем случае.

Таким образом, RC-генераторы, создающие колебания, по форме близкие к синусоидальным, хотя и не содержат колебательных контуров, но с точки зрения их поведения вблизи порога возбуждения (по обе стороны от него) они ближе к обычному ламповому генератору с колебательным контуром, чем к мультивибратору. Но, с другой стороны, в генераторах с колебательными контурами частота создаваемых незатухающих колебаний близка к собственной частоте контура, т. е. определяется величиной произведения LC. В RC-генераторах период колебаний определяется скоростью изменения напряжений при заряде и разряде конденсаторов через сопротивления, т. е. зависит от величины произведений RC (временных постоянных цепей). В этом отношении RC-генераторы сохраняют сходство с релаксационными генераторами, например с мультивибратором.

24. БЛОКИНГ-ГЕНЕРАТОР

Одним из наиболее распространенных генераторов релаксационных колебаний является так называемый блокинг-генератор, применяемый, например, в качестве генератора развертки в телевизионных приемниках, в различных измерительных схемах и т. д.

Одна из схем блокинг-генератора приведена на фиг. 48. Блокинг-генератор представляет собой схему, внешне сходную со схемой обычного лампового генератора с обратной связью, но по существу отличающуюся следующими особенностями. Прежде всего обратная связь в этом генераторе осуществляется с помощью трансформатора с сердечником, обмотки которого обладают большими индуктивностями и малым рассеянием. Поэтому обратная связь в блокинг-



Фиг. 48.

генераторе оказывается гораздо более сильной, чем в обычных ламповых генераторах.

Другое отличие состоит в том, что напряжение на сетку лампы подается не с реактивного элемента колебательного контура (емкости или индуктивности), а с активного сопротивления R, включенного последовательно в сеточный контур генератора. Это сопротивление R, включенное параллельно участку сетка—катод лампы, выбирается достаточно большим (иначе участок сетка—катод был бы практически закорочен) и поэтому весь сеточный контур блокинг-генератора, состоящий из индуктивности L_1, емкости C и сопротивления R оказывается обычно не колебательным, а апериодическим.

Помимо того, что сам по себе контур оказывается не колебательным, а апериодическим, обратная связь между анодом и сеткой, в том виде, как она осуществляется в блокинг-генераторе, не может служить для компенсации потерь в активном сопротивлении и не может превратить этот контур в колебательный.

Действительно, обратная связь в обычном ламповом генераторе потому компенсирует потери в активном сопротивлении контура, что она подает в этот контур э. д. с., противоположную по фазе падению напряжения на активном сопротивлении. Достигается это, как мы видели (§ 7), в том случае, когда напряжение на сетку лампы снимается с реактивного сопротивления контура (с конденсатора).

В обычном генераторе вследствие того, что, с одной стороны, напряжение на конденсаторе сдвинуто по фазе относительно напряжения на активном сопротивлении на $\frac{\pi}{2}$, а, с другой стороны, э. д. с. обратной связи сдвинута по фазе относительно напряжения на сетке лампы так же на $\frac{\pi}{2}$, э. д. с. обратной связи (при соответствующем включении катушки обратной связи) оказывается в фазе с падением напряжения на активном сопротивлении и компенсирует его. В случае же блокинг-генератора, так как напряжение на сетке совпадает по фазе с напряжением на активном сопротивлении, а э. д. с. обратной связи попрежнему сдвинута по фазе относительно напряжения на сетке на $\frac{\pi}{2}$, то э. д. с. обратной связи оказывается сдвинутой по фазе относительно напряжения на активном сопротивлении на $\frac{\pi}{2}$ и, следо-

вательно, не может его компенсировать. Но зато э. д. с. обратной связи оказывается сдвинутой по фазе на π относительно э. д. с., возникающей на индуктивности (так как эта последняя сдвинута по фазе на $\frac{\pi}{2}$ относительно тока в контуре, а значит и относительно напряжения на сопротивлении), и, следовательно, может ее компенсировать. Таким образом, обратная связь в блокинг-генераторе компенсирует не активное сопротивление контура в цепи сетки, а индуктивность этого контура. И если эта обратная связь достаточно сильна, то она может не только полностью скомпенсировать возникающую в контуре э. д. с. самоиндукции, но и «перекомпенсировать» ее, т. е. возникающая в контуре результирующая э. д. с. может оказаться противоположной по фазе той э. д. с., которая должна была бы возникнуть на катушке индуктивности в обычном контуре.

Наличие в контуре такой э. д. с., противоположной по фазе э. д. с. самоиндукции, как нетрудно убедиться, делает неустойчивым состояние равновесия в этом контуре. Убедиться в этом можно с помощью следующих соображений.

Как известно, обычная э. д. с. самоиндукции всегда направлена навстречу изменению тока в цепи. Поэтому если в контуре случайно происходит какое-либо изменение тока, то обычная э. д. с. самоиндукции препятствует этому изменению и, значит, не может вызывать нарастания этих случайных изменений. Но если при изменении тока в контуре в нем возникает э. д. с., противоположная по фазе, т. е. направленная навстречу обычной э. д. с. самоиндукции, то она, очевидно, будет не препятствовать, а способствовать возникшему случайно изменению тока в контуре и будет вызывать дальнейший рост этого изменения. В таком случае состояние равновесия окажется неустойчивым.

Итак, обратная связь в том виде, как она осуществляется в блокинг-генераторе, не может скомпенсировать потерь энергии в контуре сетки, но зато может, если она достаточно сильна, скомпенсировать действие индуктивности, входящей в этот контур. Если же э. д. с. обратной связи превышает ту, которая нужна для полной компенсации индуктивности контура, то значит она делает неустойчивым состояние равновесия в этом контуре.

Но величина э. д. с. обратной связи в блокинг-генераторе, так же как и в обычном генераторе, зависит от крутизны характеристики лампы. С уменьшением крутизны характе-

ристики при неизменных прочих условиях уменьшается и величина э. д. с. обратной связи. Поэтому, если выбрать рабочую точку на средней части характеристики и задать достаточно сильную обратную связь так, чтобы индуктивность была перекомпенсирована, то состояние равновесия блокинг-генератора окажется неустойчивым. Далее на некотором расстоянии от рабочей точки, по обе стороны от нее, будут лежать такие значения крутизны, при которых индуктивность контура будет как раз скомпенсирована, а еще дальше будут лежать области с еще меньшей крутизной характеристики[1], где индуктивность контура еще «недокомпенсирована», т. е. контур будет себя вести как обычный контур с обычной самоиндукцией.

Следовательно, вблизи состояния равновесия, где крутизна характеристики велика, индуктивность перекомпенсирована и состояние равновесия неустойчиво, все движения системы будут направлены от состояния равновесия, т. е. токи в контуре сетки по абсолютной величине должны нарастать. Наоборот, вдали от состояния равновесия, где крутизна характеристики мала и состояние равновесия устойчиво, все движения будут направлены к состоянию равновесия, т. е. токи в контуре сетки будут затухать. Граница между этими двумя областями, к которой направлены движения системы как с той, так и с другой стороны, соответствуют такой крутизне характеристики, при которой индуктивность контура как раз оказывается скомпенсированной.

Пользуясь изложенными представлениями, мы сможем проследить за тем, как протекает процесс колебания в блокинг-генераторе.

Вследствие неустойчивости состояния равновесия блокинг-генератор уйдет в одну из областей, далеких от состояния равновесия. Положим для определенности, что система ушла в область больших положительных напряжений на сетке. Это значит, что по сопротивлению R течет ток i, который заряжает конденсатор C. В этой далекой от состояния равновесия области все токи, в том числе и ток i, должны убывать. При этом уменьшается напряжение на сетке, а значит крутизна характеристики лампы возрастает, и в конце концов достигает значения, при котором индуктивность

[1] Уменьшение крутизны характеристики в области больших положительных напряжений на сетке в схеме блокинг-генератора может происходить не только из-за того, что рабочая точка приближается к верхнему загибу характеристики, но и вследствие появления больших сеточных токов.

сеточного контура оказывается скомпенсированной и поэтому ток в сеточном контуре может измениться скачком[1]. Этот скачок происходит так, что ток в сеточном контуре сразу изменяет свое направление. В результате такого скачка система сразу переходит в далекую область, лежащую по другую сторону от положения равновесия, т. е. в область отрицательных напряжений на сетке, где лампа почти заперта. Так как ток в сеточном контуре изменил свое направление, то конденсатор начинает разряжаться и ток начинает падать. Вместе с тем уменьшается и отрицательное напряжение на сетке, и крутизна характеристики лампы начинает возрастать. Когда крутизна характеристики достигнет значения, при котором индуктивность сеточного контура снова оказывается скомпенсированной, опять происходит скачок токов и система снова переходит далеко в область больших положительных напряжений на сетке (так как ток при скачке меняет свое направление). Далее система снова начинает двигаться к положению равновесия, и конденсатор снова начинает заряжаться и, дойдя до области, где крутизна характеристики такова, что индуктивность контура оказывается скомпенсированной, система снова скачком переходит в область больших отрицательных напряжений, снова начинается разряд конденсатора и т. д.

Таким образом, колебания в блокинг-генераторе представляют собой периодически повторяющиеся процессы заряда и разряда конденсатора, причем в момент перехода от одного процесса к другому происходит резкий скачок силы тока в сеточном контуре.

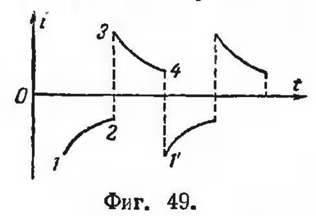
После всего сказанного нетрудно построить график изменений силы тока *i*, т. е. изобразить графически форму колебаний, создаваемых блокинг-генератором. Процессам заряда и разряда конденсатора на этом графике (фиг. 49) соответствуют участки *1—2* и *3—4*, на которых ток *i* уменьшается по абсолютной величине. Скачкообразные измене-

---

[1] В действительности в этом случае, как и во всех предыдущих случаях, когда мы говорим о скачках, происходит не скачок, а очень резкое изменение величины тока. При этом одновременно резко меняется ток как в сеточном контуре, так и в анодной цепи, так как при изменении тока в сеточном контуре изменяется напряжение на сетке, а значит изменяется и величина анодного тока. Но эти изменения токов, протекающих через обе обмотки трансформатора, происходят так, что общий магнитный поток, а значит и запасенная трансформатором магнитная энергия, не изменяется. В этом и заключается физический смысл утверждения, что индуктивность контура оказывается скомпенсированной.

ния тока происходят из точки *2* в точку *3* и из точки *4* в точку *1'*.

Период колебаний, создаваемых блокинг-генератором, определяется продолжительностью процессов заряда и разряда конденсатора, а продолжительность этих процессов определяется параметрами сеточного контура — его емкостью C, действующей индуктивностью (т. е. индуктивностью обмотки L_1, с учетом компенсирующего действия обратной связи) и, наконец, сопротивлениями R и внутренним сопротивлением участка сетка—катод лампы.



Фиг. 49.

Анализ процесса колебаний в блокинг-генераторе показывает, что с точки зрения механизма колебаний блокинг-генератор гораздо ближе к мультивибратору, чем к обычному ламповому генератору. Как и в мультивибраторе, в блокинг-генераторе происходят периодически повторяющиеся процессы заряда и разряда конденсатора, причем переход от заряда к разряду и обратно происходит в виде резких, скачкообразных изменений тока.

На примере блокинг-генератора мы еще раз убеждаемся в том, что по внешним признакам схемы генератора очень трудно судить о том, каков механизм возбуждения колебаний в нем и какой формы колебания он создает. Блокинг-генератор по внешнему виду схемы похож на обычный ламповый генератор: его сеточный контур содержит емкость и индуктивность и между анодом и сеткой существует индуктивная обратная связь. Со схемой же мультивибратора схема блокинг-генератора по внешнему виду не имеет ничего общего. И все же, как мы убедились, по характеру происходящих в нем процессов блокинг-генератор гораздо ближе к мультивибратору, чем к обычному ламповому генератору синусоидальных колебаний.

СОДЕРЖАНИЕ

К ЧИТАТЕЛЯМ

Выпуски Массовой радиобиблиотеки служат важному делу пропаганды радиотехнических знаний среди широких слоев населения нашей страны и способствуют развитию радиолюбительства. В свете этих задач большое значение имеет привлечение радиолюбительской общественности к критике каждой вышедшей книги и брошюры.

Редакция Массовой радиобиблиотеки обращается к читателям данной книги с просьбой прислать свои отзывы, пожелания и замечания вместе с краткими сообщениями о своем образовании, профессии, возрасте и радиолюбительском опыте по адресу: Москва, Шлюзовая набережная, д. 10—Редакция Массовой радиобиблиотеки Госэнергоиздата.



Цена 2 р. 90 к.